



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

“USO DE MATERIALES POLIMÉRICOS HÍBRIDOS (SINTÉTICOS-NATURALES)
EN LA ELIMINACIÓN DE LA DUREZA EN EL AGUA”

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

PAOLA SÁNCHEZ VALENCIA

DIRECTORA:

DRA. ROSA MARÍA GÓMEZ ESPINOSA

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, MAYO 2023

Tabla de contenido

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
IMPORTANCIA DE LA TEMÁTICA	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	10
OBJETIVO GENERAL	12
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN EMPLEADAS	13
INTRODUCCIÓN	15
CAPÍTULO 1. DUREZA DEL AGUA	17
1.1 Dureza del agua	18
1.2 Efectos negativos de la dureza del agua	19
1.3 Tipos de dureza del agua	21
Dureza temporal	21
Dureza permanente	22
Dureza total	22
1.4 Distribución del agua dura en México.	23
1.5 Determinación de la dureza total del agua.	23
1.6 Normas mexicanas que regulan la dureza del agua.	24
1.7 Métodos de eliminación de la dureza del agua.	25
Métodos físicos	25
Métodos mecánicos	26

CAPÍTULO 2. MEMBRANAS	37
2.1 Definición y características de las membranas de filtración.	38
2.2 Principio de funcionamiento de las membranas de filtración.	39
2.3 Clasificación de las membranas.	40
Membranas inorgánicas	40
Membranas orgánicas	42
Membranas a partir de mezclas (materiales híbridos)	50
CAPÍTULO 3. FUNCIONALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS	56
3.1 Técnicas de funcionalización de membranas poliméricas.	57
Métodos de modificación química.....	57
Métodos de modificación física.....	61
3.2 Formas de unión entre superficie-ion.	62
3.3 Caracterización de membranas.	62
MEB (Microscopia Electrónica de Barrido)	63
MFA (Microscopía de fuerza atómica)	64
MET (Microscopía electrónica de transmisión)	65
XPS (Espectroscopia foto electrónica de rayos X)	67
DRX (Difracción de Rayos X de polvos)	68
ATR (Reflectancia Total Atenuada)	69
FTIR (Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier)	69
FTIR-ATR (Infrarrojo de Transformada de Fourier- Reflectancia Total Atenuada)	70
MEB-EDS (Microscopia Electrónica de Barrido -Espectrometría de Rayos X de Energía Dispersiva)	70
3.4 Métodos de degradación de polímeros.	71
Degradación biológica (biodegradación)	71

Degradación térmica.	72
Degradación química.....	73
Degradación mecánica.....	73
Degradación por radiación.	74
CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	75
4.1 Funcionalización de membranas de polipropileno modificadas.	75
4.2 Tratamiento de la dureza del agua utilizando membranas de polipropileno funcionalizadas.	77
Evaluación de la remoción de iones metálicos (Ca^{+2} y Mg^{+2}) con membrana modificada.....	78
CAPITULO 5. CONCLUSIONES	79
BIBLIOGRAFÍA.....	80
 Figura 1 Ejemplos de efectos adversos de la dureza del agua	9
Figura 2 Origen de la dureza del agua en recursos subterráneos	18
Figura 3 Efectos adversos de la dureza del agua.	20
Figura 4 Origen de la dureza del agua en la naturaleza.	21
Figura 5 Proceso de tratamiento de la dureza del agua con membranas.	28
Figura 6 Ejemplo de un equipo industrial para el tratamiento de la dureza del agua por ósmosis inversa.	29
Figura 7 Proceso del tratamiento de la dureza del agua con un equipo de intercambio iónico.	30
Figura 8 Ejemplo de un equipo industrial para el tratamiento de la dureza del agua por intercambio iónico.	31
Figura 9 Proceso de tratamiento de la dureza del agua por electrodiálisis.	32
Figura 10 Ejemplo de un equipo industrial de electrodiálisis.	33
Figura 11 Ejemplo de un equipo industrial de nanofiltración.	35
Figura 12 Espectro de filtración. Created with ChemSketch Freeware.	36

Figura 13 Estructura química del quitosano.....	44
Figura 14 Estructura química del polipropileno.	48
Figura 15 Estructura química del polipropileno isotáctico.	49
Figura 16 Principios de la química verde.	51
Figura 17 Microscopio electrónico de barrido.	64
Figura 18 Microscopio de fuerza atómica.	65
Figura 19 Microscopio Electrónico de Transmisión.	66
Figura 20 Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X	67
Figura 21 Difracción de rayos X de polvos.	68
Figura 22 Espectroscopía de Infrarrojo/ATR.	70
Figura 23 Identificación de membranas.	75
Figura 24 Modificación de la membrana de polipropileno con soluciones de quitosano.	76
Figura 25 Introducción de la membrana al fotoreactor.	76
Figura 26 Fotoreactor marca Luzchem	77
Figura 27 Espectro TF-IR-ATR.....	77
Ecuación 1 Formación del agua dura en la naturaleza	19
Ecuación 2 Cálculo de la dureza total del agua por valoración separada.	24
Ecuación 3 Cálculo de la dureza del agua por evaluación complejométrica.	24
Tabla 1 Clasificación de la dureza del agua por CaCO ₃ , según la OMS (2011)	23
Tabla 2 Límite de dureza total en el agua. (NOM-127-SSA1-1994, 1995)	25
Tabla 3 Clasificación de ácidos y bases duros. (Douglas, 1994)	54
Tabla 4 Remoción de iones Ca ⁺² y Mg ⁺² y número de filtraciones.	78
Gráfica 1 Remoción de Ca ⁺² vs número de filtraciones y remoción de Mg ⁺² vs número de filtraciones.	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

En la presente tesina se expone la síntesis y evaluación de una membrana de polipropileno modificada con quitosano, para la remoción de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} , los cuales generan la dureza en el agua. Se encontró que la membrana modificada es eficiente para eliminar la dureza, ya que los grupos funcionales como son los grupos amino e hidroxilo, se coordinan con los iones metálicos en estudio, logrando removerlos de la solución; también se analizó el reúso de la membrana filtrando en cuatro ocasiones y con ello logrando incrementar el porcentaje de remoción. Es importante mencionar que el proceso de modificación de la membrana es sencillo, barato y que genera un material que puede ser fácilmente degradado; por lo que en esta tesina estamos mostrando un material que es eficiente para la eliminación de la dureza en el agua.

ABSTRACT

Our aim with this paper was to tackle the synthesis and evaluation of a polypropylene membrane modified with chitosan with the purpose of removing both Ca^{+2} and Mg^{+2} ions, which cause hardness of water. We found that this membrane modification is effective in the elimination of hardness since functional groups such as amino and hydroxyl groups coordinate with the metal ions mentioned above and manage to remove them from the solution. At the same time, we analyzed the reuse of the membrane by filtering it four times, which increased the removal percentage. It is relevant to mention that the membrane modification process is simple, cheap and that the resultant material can be easily decomposed. In conclusion, in this thesis we discuss about a material that is efficient for the removal of the hardness of water.

IMPORTANCIA DE LA TEMÁTICA

El agua dulce para consumo nacional según datos de la CONAGUA (2019) se encuentra distribuida entre 649 cuencas superficiales y 653 acuíferos o cuencas subterráneas, de los cuales el segundo representa el 39.2% del volumen de agua de uso y el primero el porcentaje restante. Estos números han variado año con año debido a la sobreexplotación de los recursos hídricos del país.

Una de las variables involucradas en la medición de la calidad del agua de consumo es la dureza, en las cuencas superficiales es un término con poca importancia debido a la presencia mínima de minerales, sin embargo, cobra gran relevancia en los acuíferos, por el constante contacto del agua con minerales de origen geológico como el calcio y el magnesio, principales responsables de generar la dureza. De acuerdo a la CONAGUA (2021), aproximadamente el 54% de las cuencas hidrológicas subterráneas monitoreadas en México contienen agua dura, el 21% corresponden a agua muy dura y el restante a blanda.

Los problemas del uso de agua dura son más notorios con el paso del tiempo. En el hogar se observa en forma de incrustaciones de “sarro” en lugares que entran en contacto con el vital líquido, tales como los grifos, tuberías, electrodomésticos, el baño en general, etc. (Ver fig. 1), además de notarse al momento de lavar y tener que usar más jabón para hacer espuma; en la parte agrícola la presencia de iones de Ca^{+2} y Mg^{+2} puede resultar en la inactivación de químicos del fertilizante afectando su eficiencia (Moreno y Peñaranda, 2016).

Otra de las áreas donde es importante tomar en cuenta la calidad del agua es en la industria, aquí las consecuencias de la dureza en el agua se pueden observar en forma de incrustaciones de carbonatos en tuberías y equipos como bombas, calderas, válvulas, torres de enfriamiento, entre otros, acelerado por cambios en la temperatura y provocando, entre otras cosas, la reducción del flujo, corrosión, sobrecalentamiento y la disminución del rendimiento del proceso y del producto final, esto último si se requieren condiciones específicas para el agua de proceso. En todos los casos se deriva en indeseables problemas económicos y ambientales. (Neira-Gutiérrez, 2006)



Figura 1 Ejemplos de efectos adversos de la dureza del agua (Intech, 2019)

Fundamentado en los datos anteriores, con la presente tesina se busca examinar y validar los beneficios del uso de membranas poliméricas de polipropileno modificadas con quitosano para el tratamiento de la dureza del agua, apoyando el enfoque de sustentabilidad ambiental y económica, muy importantes hoy en día.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

El agua es un líquido muy importante en la vida del ser humano por sus extensas aplicaciones en diversos campos, debido a ello es necesario obtener agua de calidad. Toda el agua que se utiliza tiene diferentes niveles de dureza, por lo que este es uno de los parámetros a considerar en la calidad de la misma, además de que es un factor de riesgo económico y de eficiencia en cualquier proceso donde se utiliza, derivando a la vez en problemas energéticos y medioambientales.

Hablando de como la dureza del agua perjudica actividades específicas, se sabe que en la industria alimenticia los iones presentes por la dureza del agua reducen las propiedades organolépticas en el alimento y/o favorece reacciones indeseables en ellos (Tinoco-Martínez, 2016); en la industria textil provoca manchas a la hora del teñido y acabado, afectando la absorción del tinte (Córdoba y Jesús, 2012); además que, para fines analíticos y químicos, la dureza estimula la formación de precipitados inhabilitando la reacción (González-Ruiz, 2018).

Por otro lado, los problemas que presentan en común las industrias, por procesos universales como el transporte de agua, lavado, generación de vapor y enfriamiento aunado a que se llevan a cabo en lugares cerrados de difícil acceso; son las incrustaciones de carbonatos, corrosión, obstrucciones, deterioro de los materiales y en general una pérdida en la eficiencia del equipo o proceso (Neira-Gutiérrez, 2006)

De este modo, la dureza es un problema que se ha intentado solucionar por diferentes medios, originando que actualmente existan diversos métodos para el tratamiento de la dureza del agua, tanto a nivel industrial como doméstico. Las técnicas por filtración son las más factibles ya que proporcionan mayor selectividad, bajo consumo de energía y se pueden adaptar a las diversas condiciones que presente el flujo de alimentación.

Técnicas como la ósmosis inversa, intercambio iónico, electrodiálisis o nanofiltración, son comunes en el tratamiento del agua dura. En todas ellas el medio

de filtración es la parte medular del proceso, por lo que las membranas, resinas, zeolitas, etc., son puntos de investigación vigentes para la mejora de la eficiencia del tratamiento. Trabajos como el de Ghanbarizadeh et al. (2022), que hace referencia a la modificación de zeolitas naturales de carbón y alúmina activada, para conocer bajo qué condiciones presentan mejores propiedades de adsorción en el tratamiento de la dureza del agua; son la evidencia de ello.

Bajo esta enmienda, con la presente tesina se busca ahondar en el efecto que tiene el uso de membranas poliméricas híbridas, específicamente de polipropileno modificada con injertos de quitosano, en la remoción de iones de Ca^{+2} y Mg^{+2} o lo que es lo mismo, para el tratamiento de la dureza del agua. Esto con la investigación íntegra alrededor de dos temas generales: la dureza del agua y membranas. Dicha tesina se distingue de investigaciones similares por la propuesta de aprovechar las propiedades conjuntas de las membranas poliméricas híbridas, exactamente de polipropileno y quitosano.

De esta manera la pregunta que sustenta el desarrollo de esta tesina es ¿Cuál es el efecto del uso de membranas poliméricas híbridas de polipropileno modificadas con quitosano para el tratamiento de la dureza del agua?

OBJETIVO GENERAL

Documentar el efecto que tiene el uso de membranas poliméricas híbridas de polipropileno modificadas con quitosano en el tratamiento de la dureza del agua.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Realizar una búsqueda documental partiendo de los temas generales: dureza del agua y membranas.

Identificar los beneficios de la modificación de membranas poliméricas, específicamente de polipropileno con quitosano.

Examinar los beneficios del uso de membranas híbridas de polipropileno y quitosano en el tratamiento de la dureza del agua.

Obtener evidencia en laboratorio sobre la efectividad del uso de membranas de polipropileno y quitosano en la remoción de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} .

MÉTODOS Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN EMPLEADAS

Esta investigación es de carácter mixto. De acuerdo con Hernández-Sampieri y Mendoza (2014) el método de investigación mixto corresponde a un enfoque más completo en la investigación de un fenómeno, al obtener datos desde dos perspectivas distintas, la cualitativa y cuantitativa. Es decir, en base a la experimentación para la obtención de datos numéricos y con la investigación documental entorno a tal hecho, como ejemplo. Con ésto se logra fortalecer y agregar valor al estudio, entendiendo lo mejor posible el comportamiento del fenómeno.

Reafirmando lo dicho anteriormente, esta tesina es resultado de una investigación mixta, con la metodología cuantitativa se llevaron a cabo dos etapas generales en laboratorio, la primera para la funcionalización de membranas de polipropileno con quitosano, la segunda para reproducir el fenómeno de filtración de agua dura usando las membranas modificadas y caracterizándolas para encontrar la eficiencia de remoción de iones causantes de la dureza en el agua. Para la parte cualitativa se realizó una exhaustiva investigación documental, usando un método deductivo a partir de dos temas globales; dureza del agua y membranas.

Por la esencia de una tesina, en este documento se hace uso primordial de la técnica de investigación documental. Martínez-González (1979) determinó a la investigación documental como uno de los dos grandes tipos de investigación donde se utilizan referencias de apoyo históricas documentadas, ya sean escritas u orales, esto para sustentar una nueva investigación o enfoque en torno a un tema específico.

El acelerado avance de la tecnología en los últimos años ha permitido la enorme difusión de conocimientos en fuentes muy variadas, con lo que se pudo acceder al uso de recursos bibliográficos como libros para la consulta de temas comunes, ejemplo principios de reactividad química; normas en torno a la dureza del agua; artículos de revistas para contenido especializado, ejemplo las membranas; por la

parte filmográfica y para un mejor entendimiento de los equipos de caracterización de materiales se visualizaron archivos de video; además para la obtención de material como imágenes se consultaron páginas web. Solo por mencionar algunos ejemplos de la aplicación en esta tesina de la técnica de investigación documental.

Para poder sustentar de manera cuantitativa la tesina se empleó la metodología de investigación experimental. Conforme a Baena-Paz (2017) la investigación experimental está sustentada en la manipulación de variables para medir las condiciones bajo las que se produce un hecho en particular, siendo consciente a la vez de la naturaleza de la misma.

Como ejemplo del empleo de la metodología de investigación experimental, se llevó a cabo en laboratorio la manipulación de membranas de polipropileno para realizarles injertos de quitosano usando la técnica de foto injerto, además estas membranas modificadas se utilizaron en la filtración de agua dura para la obtención de la eficiencia de la membrana en la retención de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} con la caracterización de la misma por la técnica FTIR-ATR.

En concordancia con los métodos de investigación usados, como primer paso se establecieron las etapas a seguir en la investigación. Como punto número uno se propuso la entrada a laboratorio para adentrarse en el tema con la funcionalización de membranas de polipropileno con quitosano. Como punto dos se realizó la búsqueda documental alrededor de dos temas generales, dureza del agua y membranas. Por último y como punto tres se llevó a cabo en laboratorio el proceso de filtración de agua dura con las membranas funcionalizadas, caracterizándolas para la obtención de su eficiencia en la remoción de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} .

Con ello se pretenden lograr los objetivos propuestos en la realización de la tesina los cuales en general son: la búsqueda documental alrededor de la dureza del agua y las membranas, entrar a laboratorio para obtener datos cuantitativos que sustenten la investigación y como conclusión la adquisición de un nuevo conocimiento sobre los beneficios que se consiguieron con la modificación de la membrana de polipropileno con quitosano en el tratamiento de la dureza del agua.

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales más utilizados en variedad de ámbitos, desde su uso común en el hogar, hasta su requerimiento en procesos del sector industrial, lo que también hace necesario su transporte hacia los lugares donde se requiera. Sin embargo, su origen lo dota en menor o mayor medida, de propiedades como la dureza, que, aunque no es un factor dañino en la salud humana, si tiene efectos adversos en cuestión económica y de eficiencia de procesos.

Ejemplo de ello son los enormes gastos económicos que requiere sustituir sistemas de tuberías tapadas o equipos dañados por incrustaciones de “sarro”; suplir o hacer un mayor uso de productos químicos como jabones o herbicidas que pierden su eficiencia ante la presencia de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} ; e incluso obtener artículos de baja calidad como medicamentos o productos alimenticios. Todos los ejemplos anteriores, teniendo en común el uso de agua en alguna etapa de su proceso o uso. Es por ello la importancia de obtener agua en la mayor medida posible, libre de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} , principales componentes del agua dura.

La calidad del agua no es una problemática nueva, por lo que ya existen diversos métodos para solucionar tal dificultad, desde procedimientos sencillos como el calentamiento del agua, hasta el uso de equipos mecánicos como el de ósmosis inversa, que permiten obtener agua más limpia. El factor común en las metodologías más empleadas, por su alto porcentaje de remoción de sustancias indeseables como la dureza, es el uso de medios filtrantes como las membranas. Y ya que la etapa de filtración es el paso más importante, estas incrementan su precio y la del equipo.

Dicho lo anterior, se pone especial enfoque en mejorar cuatro elementos principales del medio filtrante: el factor económico, su selectividad, permeabilidad y, por último, su biodegradabilidad. Por lo cual ya se han hecho intensas investigaciones empleando diversos tipos de medios filtrantes, tanto orgánicos como inorgánicos e incluso híbridos, y transformándolas con técnicas distintas como la polimerización por injerto con diferentes longitudes de onda o la funcionalización con plasma. Sin

embargo, va disminuyendo la información de acuerdo al enfoque o fin para el que se requiera usar.

En el caso de la presente tesina, se busca avalar la factibilidad del uso de membranas de polipropileno modificadas con quitosano, para la remoción de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} , causantes de la dureza en el agua, partiendo de los beneficios que ambos materiales aportan por separado, como material de membranas y en un proceso de filtración. Cumpliendo con los cuatro elementos principales que se busca en una membrana: factibilidad económica, selectividad, permeabilidad y biodegradabilidad; desde su síntesis y hasta su evaluación.

CAPÍTULO 1. DUREZA DEL AGUA

El capítulo 1 denominado “Dureza del agua” se divide en siete temas principales, el primero de ellos y como introducción al asunto principal de esta tesina, inicia con la definición de “dureza” del agua de la mano de fuentes como las Normas Oficiales Mexicanas sobre “Análisis del Agua”, además de explicar su origen en la naturaleza. En el tópico dos “Efectos negativos de la dureza del agua” se hace mención de los inconvenientes de la presencia de iones de Ca^{+2} y Mg^{+2} , donde y como se puede observar en el hogar y diferentes sectores de la industria, así como en la agricultura.

El siguiente ámbito a tratar “Tipos de dureza del agua”, versa sobre la dureza temporal, permanente y total, su origen, características y algunas recomendaciones prácticas de remoción dependiendo del tipo de ion presente en cada clasificación, además se colocan los límites de concentración de iones para considerar cada categoría. Para el contenido del apartado cuatro “Distribución del agua dura en México”, se hace referencia a datos obtenidos de la CONAGUA sobre la distribución del agua de consumo en México y porcentajes de contenido de dureza en las cuencas subterráneas.

El asunto para el tema cinco “Determinación de la dureza total del agua” trata acerca del método más recomendado para la determinación de la dureza en México de acuerdo a la NMX-AA-072-SCFI-2001 (2000), que describe el análisis volumétrico de la muestra usando la técnica de titulación y con la formación de complejos. El tópico posterior se titula “Normas mexicanas que regulan la dureza del agua” y como su nombre lo indica, aquí se cita la principal Norma en México que regula los límites de concentración permitidos de dureza en agua, de uso tanto público como privado, la NOM-127-SSA1-1994 (1995).

Y, por último, el título del apartado número siete es “Métodos de eliminación de la dureza del agua”, en el cual se mencionan técnicas y equipos para la disminución de la concentración de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} , divididos en dos categorías: métodos físicos y métodos mecánicos. En el primero de ellos solo se describe la técnica de calentamiento del agua, que se utiliza más para la remoción de iones presentes en el agua denominada blanda.

Para la categoría de métodos mecánicos, se describen cuatro técnicas de eliminación de iones que fomentan la dureza del agua, ósmosis inversa, intercambio iónico, electrodiálisis y nanofiltración; añadiendo sus características, principio de funcionamiento e incluyendo imágenes del equipo. Por último, se menciona el efecto del espectro de filtración en el tamaño de poro de una membrana y por lo tanto en la filtración de partículas.

1.1 Dureza del agua

La dureza del agua se entiende como la cantidad de minerales que contiene un determinado volumen de agua, la cual se adquiere de la naturaleza para su uso ya sea en el sector público o privado. Su obtención es a partir de cuencas superficiales y acuíferos (*Ver fig. 2*), estos le deben su dureza a la interacción constante con minerales del subsuelo. Dos de los minerales más comunes en la naturaleza son el calcio (4.15%) y el magnesio (2.33%) por lo que ambos son componentes mayoritarios de rocas en forma de dolomita, caliza o magnesita (Sanchis, 2021). Por su abundancia representan el 95% de lo que se conoce como dureza del agua (Neira-Gutiérrez, 2006), y es por ello que se toman como base en la literatura para representar la dureza total como concentración de $CaCO_3$ en mg/l .

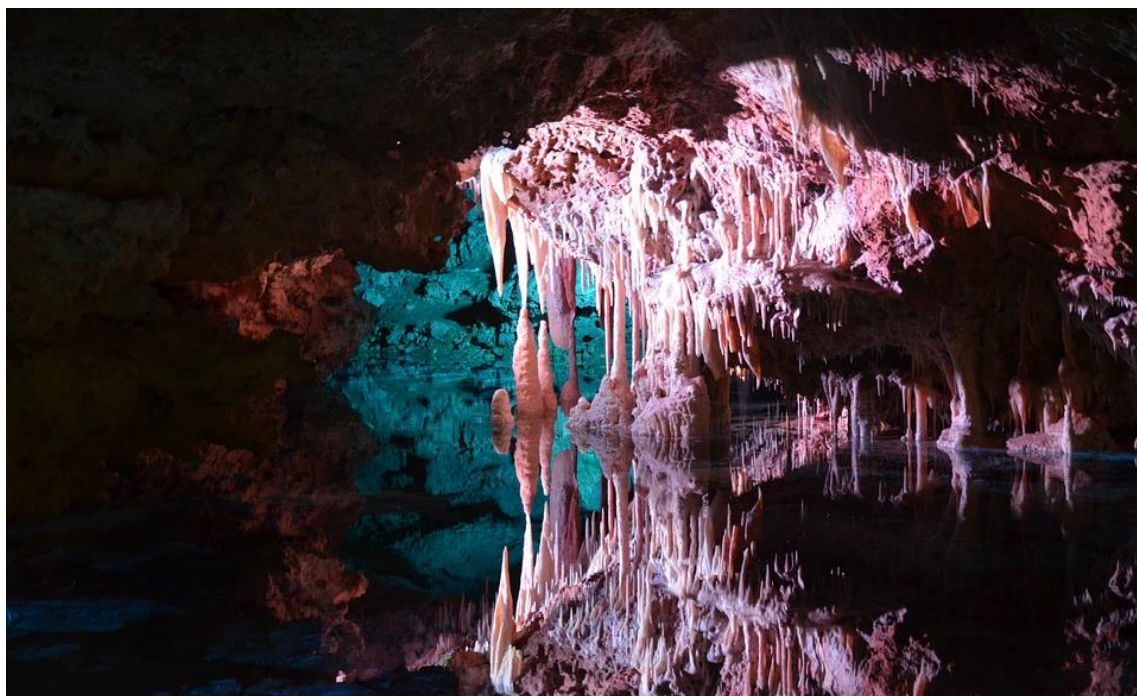
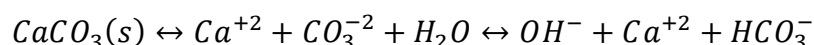


Figura 2 Origen de la dureza del agua en recursos subterráneos (Beccalee, 2016)

En términos generales se habla de agua dura cuando esta contiene una concentración alta de minerales Ca^{+2} y Mg^{+2} y, por otro lado, se considera blanda cuando dichos iones casi no se encuentran o están muy dispersos en la solución. (Facsa, 2016). El nivel de dureza depende de la composición y de la cantidad de minerales presentes en el terreno de donde se obtiene el líquido. Los carbonatos de las rocas son consecuencia de reacciones químicas en la naturaleza entre el Ca^{+2} y/o Mg^{+2} y el dióxido de carbono presente en la atmósfera. (NMX-AA-072-SCFI-2001, 2000). Por su parte el agua dura es producto de varias reacciones de equilibrio en la naturaleza, donde en presencia de minerales provenientes de las rocas y el agua del ecosistema, la reacción se torna de la siguiente manera:

Ecuación 1 Formación del agua dura en la naturaleza



Donde el carbonato sólido, ya sea de calcio o magnesio presente en formaciones rocosas, al disolverse en agua se descompone en iones de $\text{Ca}^{+2}(\text{Mg}^{+2})$ y CO_3^{-2} . Este último ion al reaccionar con el agua prefiere la formación de iones OH^- (posteriormente agua) y HCO_3^- , iones que le dan junto con el $\text{Ca}^{+2}(\text{Mg}^{+2})$ la propiedad de dureza al agua.

1.2 Efectos negativos de la dureza del agua.

El agua dura no es dañina para la salud sin embargo entre más alta sea la concentración de minerales de Ca^{+2} y Mg^{+2} y con el paso del tiempo, su presencia se hace más notoria y el daño externo más evidente. Por ejemplo, se pueden observar incrustaciones blanquecinas de cal fuertemente adheridas a la superficie de donde se contiene o transporta el agua, lo cual es un gran problema en espacios cerrados como tuberías y equipos o recipientes, tanto domésticos como industriales (Sánchez, 2021), ya que provocan obstrucciones que derivan en la disminución de la eficiencia del proceso o equipo y por lo tanto en pérdidas económicas. Se anexan algunas imágenes de estos efectos adversos (Ver fig. 3).



Figura 3 Efectos adversos de la dureza del agua. (Agua servicio Hurtado, 2019)

Hablando de entornos más específicos como en el hogar, los efectos negativos del agua dura se observan en forma de incrustaciones de “sarro” en lugares que entran en contacto con el vital líquido, tales como llaves, tuberías, calentadores, electrodomésticos, depósitos, el baño en general, etc. Por otra parte, también se puede notar a la hora de requerir mucho jabón para formar espuma para lavar utensilios o ropa y en la ducha diaria. (Moreno y Peñaranda, 2016).

En sectores de la industria donde se utiliza agua, verbigracia en la industria alimenticia, donde la calidad del agua es esencial para obtener productos de calidad, los minerales del agua dura reducen las propiedades organolépticas en el alimento, favoreciendo reacciones indeseables en ellos (Tinoco-Martínez, 2016). En el sector agrícola la presencia de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} deriva en la inactivación de los componentes activos de fertilizantes disminuyendo su eficiencia (Moreno y Peñaranda, 2016). En el área textil, la dureza provoca manchas indeseables en tejidos (Córdoba y Jesús, 2012).

Otro ejemplo se percibe en las farmacéuticas donde se pueden presentar otro tipo de reacciones adversas en lugar de las deseadas, contaminando los productos. Además, en procesos universales de la industria como lavado, enfriamiento, calentamiento, o procesos físicos como la filtración, que implican el uso de equipos como torres de enfriamiento, intercambiadores de calor, calderas, bombas y en general lugares cerrados de difícil acceso, el agua dura provoca incrustaciones de carbonatos, corrosión, obstrucciones, deterioro de los materiales y en general una pérdida en la eficiencia del equipo y/o proceso (Neira-Gutiérrez, 2006).

De este modo, la dureza es un problema que se ha intentado solucionar por diferentes medios, originando que actualmente existan diversos métodos para tratarla, tanto a nivel industrial como doméstico. Las técnicas de filtración con membranas son las más factibles e investigadas hoy en día por sus múltiples beneficios, entre ellos que permiten selectividad y eficiencia en el proceso, además de ser rentables y ser de bajo consumo de energía.

1.3 Tipos de dureza del agua

Dureza temporal

Todo en la naturaleza tiende a la estabilidad, es debido a esto que en condiciones ambientales se llevan a cabo reacciones como la que sucede para obtener agua e iones de minerales como el Ca^{+2} , Mg^{+2} y carbonato ácido (bicarbonato) (Julián-Soto, 2009), a partir de dos fuentes, una de ellas la reacción que ocurre entre el dióxido de carbono (CO_2) presente en la atmosfera al entrar en contacto con el agua (H_2O) de sistemas de aguas naturales, y la otra a partir del carbonato (CO_3^{2-}) proveniente de la erosión de rocas calizas en el agua (Ver fig. 4). (Mota, 2011)

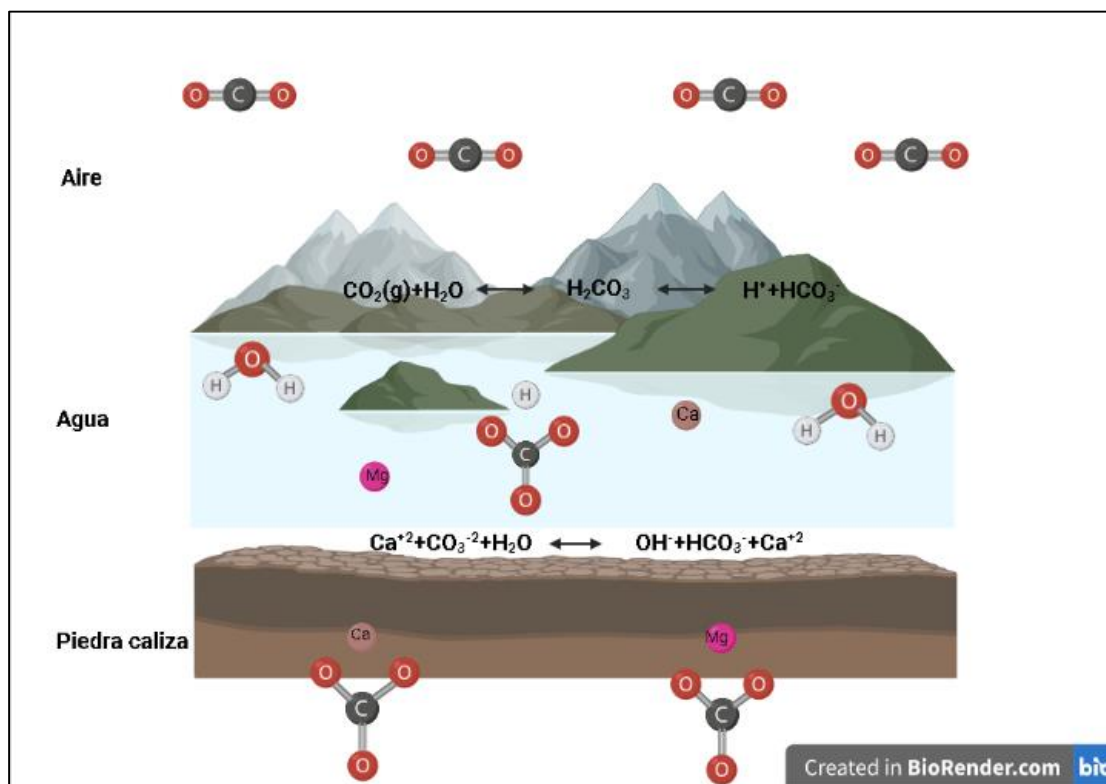


Figura 4 Origen de la dureza del agua en la naturaleza. "Creado en BioRender.com"

Estas reacciones son las causantes de la dureza que se denomina “temporal”, donde dichos iones se pueden eliminar a través de la ebullición, entre estos iones los más representativos son el Ca^{+2} , Mg^{+2} y HCO_3^- (Romo y Chilpa, 2017). Como se dijo, este equilibrio se puede revertir al añadir temperatura o cal, promoviendo de nuevo la formación del carbonato, el cual precipita como sólido blanco insoluble y que se puede separar por algún método de separación física como la decantación, obteniendo así un agua más blanda al enfriarse.

Dureza permanente

El suelo se compone de una gran variedad de minerales, en mayor o menor cantidad, entre ellos los cloruros (Cl^-) y sulfatos (SO_4^{-2}), los cuales caracterizan a la dureza permanente junto con sus contrapartes los iones metálicos divalentes (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Sr^{+2} , Fe^{+2}) (Rodríguez-Zamora, 2009). La dureza permanente también se conoce como dureza no carbonatada y, por la naturaleza de los iones que contiene es más soluble al aumentar la temperatura, hecho por el cual se tienen que utilizar otros métodos para eliminar su dureza, como la adición de cal o su combinación con carbonato de sodio, dependiendo de la composición. Los cloruros y sulfatos son más comunes en suelos áridos o secos.

Dureza total

Se toma como dureza total a la suma de todos los iones presentes en la dureza permanente y temporal, es decir la suma de los iones calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}), y los aniones cloruro (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-) y sulfato (SO_4^{-2}), principalmente (Bautista, 2019). Sin embargo, en la mayoría de casos en la literatura se engloban los diferentes minerales que contribuyen con la dureza como $CaCO_3$, por ser un término más práctico y sencillo de manejar (OMS, 2011). Además de los iones, lo que también determina la dureza del agua es la temperatura y el pH. Otra forma de clasificar la dureza del agua es de acuerdo a rangos de concentración del carbonato cálcico (Rodríguez-Zamora, 2009), de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 1 Clasificación de la dureza del agua por CaCO_3 , según la OMS (2011)

Tipo de Agua/ Concentración ($\frac{\text{mg}}{\text{l}}$)
Blandas (<60)
Duras intermedias (61-120)
Duras (121-180)
Muy duras (>180)

1.4 Distribución del agua dura en México.

El agua dulce para consumo nacional según datos de la CONAGUA (2019) se encuentra distribuida entre 649 cuencas superficiales y 653 acuíferos o cuencas subterráneas, de los cuales el primero representa el 60.8% del agua para consumo nacional y el segundo el 39.2% del volumen de agua de uso. Estos números han variado año con año debido a la sobreexplotación de los recursos hídricos del país.

Una de las variables involucradas en la medición de la calidad del agua de consumo es la dureza, en las aguas superficiales es un término con relativa poca importancia debido a la presencia mínima de minerales, sin embargo, cobra gran relevancia en los acuíferos por su constante contacto con minerales del subsuelo, de origen geológico como el calcio y el magnesio, principales responsables de generar la dureza en el agua. De acuerdo a la CONAGUA (2021) aproximadamente el 54% de las cuencas hidrológicas subterráneas monitoreadas en México contienen agua dura, el 21% corresponden a agua muy dura y el restante a blanda. Es debido a dichos datos la importancia de obtener tratamientos eficientes que remuevan estos iones.

1.5 Determinación de la dureza total del agua.

El análisis de la cantidad de iones causantes de la dureza, presentes en una determinada cantidad de agua, se puede determinar por dos vías. La primera de ellas y de acuerdo a Ramírez (2015), haciendo valoraciones complejométricas a los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} por separado, bajo las condiciones que estos requieran, y posteriormente calculando la concentración total con la ecuación 2.

Ecuación 2 Cálculo de la dureza total del agua por valoración separada.

$$\frac{CaCO_3(mg)}{L} = 2.497 \left(Ca \frac{mg}{L} \right) + 4.118 \left(Mg \frac{mg}{L} \right)$$

Utilizando los coeficientes por la relación entre la masa del carbonato cálcico y el calcio y/o magnesio, respectivamente.

La segunda vía, siendo que es más factible y por esto detallada y recomendada por la norma NMX-AA-072-SCFI-2001 (2000), es la valoración total de iones alcalinotérreos por volumetría de formación de complejos. Consiste en preparar el analito ajustándolo a un pH de 10, en un medio de amonio/amoniaco como solución amortiguadora y con gotas de negro de eriocromo T como indicador. Esta solución se valora con un reactivo titulante de concentración conocida, en este caso con el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA).

Cuando se llega al punto final de la formación de los complejos se obtiene sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético con los iones calcio y magnesio, distinguido por un cambio en la coloración de la solución, tornándose de rojo a azul. La concentración desconocida del analito se obtiene con la Ecuación 3, expresando el contenido como $CaCO_3$ en $\frac{mg}{l}$.

Ecuación 3 Cálculo de la dureza del agua por evaluación complejométrica.

$$CaCO_3 \left(\frac{mg}{L} \right) = \frac{(A - B) * C * 1000}{D}$$

Donde:

A= mL de EDTA gastados en la titulación.

B= mL de EDTA gastados en la titulación en el blanco si es utilizado.

C= mg de $CaCO_3$ equivalentes a 1 mL de EDTA

D= mL de la muestra.

1.6 Normas mexicanas que regulan la dureza del agua.

La "01-18-96 NORMA Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-1994, 1995), Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y

tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización”, es la principal norma en México que establece los límites de contaminantes o sustancias que vulneran la calidad del agua, en cualquier sector (ya sea público o privado); para este caso en particular, se tomara como referencia el límite de dureza total, el cual es de:

Tabla 2 Límite de dureza total en el agua. (NOM-127-SSA1-1994, 1995)

Característica	Límite permisible (mg/L)
Dureza total (como CaCO_3)	500.00

Adicionalmente propone que se usen algunos métodos para tratar la dureza del agua los cuales son por Ablandamiento químico o Intercambio iónico.

1.7 Métodos de eliminación de la dureza del agua.

El método que se use para disminuir o eliminar la dureza del agua depende de la concentración y naturaleza de los minerales que contenga, además del uso que se le requiera dar. Esto es debido a que los requerimientos de calidad varían si el agua es para consumo doméstico o industrial, y en este último también dependiendo del sector al que va dirigido, verbigracia el área farmacéutica o de alimentos. Con este fin se han adquirido diversas técnicas, desde simples como el calentamiento, hasta el uso de equipos como el de ósmosis inversa. Los métodos de tratamiento de la dureza del agua conocidos hasta ahora se describen a continuación.

Métodos físicos

Por calentamiento

Este método se utiliza normalmente para el agua con dureza temporal, ya que los minerales que contiene son menos solubles al calentar la solución, provocando que se formen costras de carbonato que precipitan o se adhieren al recipiente, permitiendo así su separación del agua por algún método físico como la decantación o la filtración. (UPM, 2015)

Suavizado con cal

iones como el sulfato, calcio, magnesio y el bicarbonato, son prácticamente insolubles a un pH determinado, ya que este cambio en el medio fomenta la precipitación de dichos minerales. Es por esto que la adición de cal al agua, que cambia el pH del entorno, promueve la formación de sulfatos o carbonatos de calcio o magnesio que precipitan, permitiendo la eliminación de estos iones del agua a través de la decantación o filtración. (Veolia Water Technologies, 2016)

Método electromagnético

En este método se hace pasar el agua a través de un campo electromagnético, el cual provocara la formación de carbonatos directamente en el agua que se pueden separar fácilmente por filtración o sedimentación directa en el drenaje. Es un método sencillo y que por lo mismo es más práctico para uso doméstico. (AquaHomeGroup, 2021)

Métodos mecánicos

Los métodos mecánicos más empleados para el tratamiento de la dureza del agua, llevan a cabo como etapa esencial de su operación una filtración. La filtración es un proceso físico que consiste en hacer pasar un líquido por un medio semipermeable, el cual retendrá las impurezas que se permitan de acuerdo al tamaño del poro y naturaleza del medio filtrante, esto bajo la acción de una fuerza impulsora como lo es la presión, la diferencia de concentración, o por la influencia de un polo eléctrico. (Vásquez et al., 2016). Estos métodos se describen a continuación.

Ósmosis Inversa o hiperfiltración.

La osmosis inversa normalmente se utiliza para remover materiales de rangos iónicos y/o moleculares (aproximadamente de 0.0001 micrómetros), es un proceso físico-químico que consiste en revertir el proceso normal de la osmosis aplicando una fuerza (presión) superior a la presión osmótica, lo que permite forzar el paso de la solución a través de una membrana semipermeable que retiene selectos iones dejando pasar solo el agua (Arriagada et al., 2001). Dicha selectividad depende de

la configuración de la membrana y de la naturaleza del agua a tratar, mejorando así la calidad de la misma.

El proceso de filtración por ósmosis inversa consta de cinco etapas de filtración, la primera de ellas con un filtro de sedimento que recibe el agua a tratar y retiene impurezas grandes como tierra, arena o partículas en suspensión, en la segunda etapa se hace pasar el agua por un filtro de carbón activado que no deja pasar partículas como el cloro, especies orgánicas, olores y sabores. (Vázquez-Mellado, 2017)

El tercer paso consiste en un filtro combinado de carbón activado con poros más pequeños que retiene las mismas partículas que el anterior, pero de forma más específica. La cuarta fase incluye una membrana semipermeable la cual elimina prácticamente todas las impurezas restantes de tamaño molecular e iónico, y finalmente para asegurar la calidad del agua obtenida, esta se hace pasar por un posfiltro. (Aqua Fundación, 2021)

Todas estas etapas permiten obtener agua más limpia gracias al tamaño de los poros y a la preferencia que le da la membrana al paso del agua, reteniendo las impurezas que se desean eliminar; por ejemplo, con la eliminación de los iones presentes en el agua dura al pasar por una membrana selectiva (Ver fig. 5).

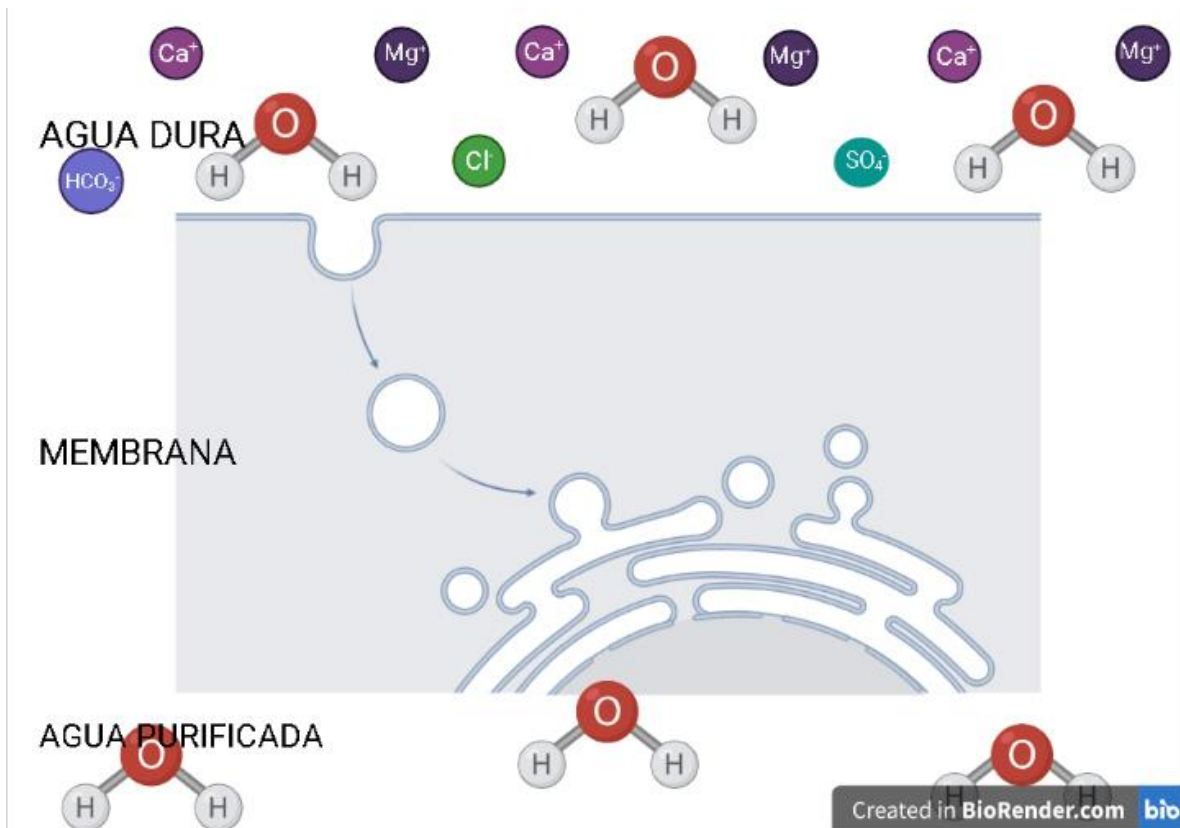


Figura 5 Proceso de tratamiento de la dureza del agua con membranas. "Creado en BioRender.com"

Las membranas que más se utilizaban anteriormente en la ósmosis inversa, por ser las primeras en producirse a nivel comercial, fueron las de acetato de celulosa, sin embargo, con el avance de la investigación y la tecnología se han encontrado mejores materiales para trabajar que permiten tener un mayor control del tamaño de los poros y por lo tanto una mejor permeabilidad y selectividad, como lo son actualmente las membranas de poliamida. (AEDyR, 2019)

En el proceso de osmosis inversa se involucran diversos componentes y etapas que dependen de diversos factores, como el ámbito donde se va a ocupar, si es para uso doméstico o industrial, el tipo de contaminantes que se desean retener, el caudal a tratar, el nivel de pureza que se desea obtener, entre otras variables. Pero en general los componentes principales que caracterizan a un equipo de osmosis inversa son: válvulas de control, pretratamiento, membrana, panel de protección, mando y control, medidores de flujo, bomba, post tratamiento y tanque de almacenamiento (Ver fig. 6) (ProdeteCS, 2019).

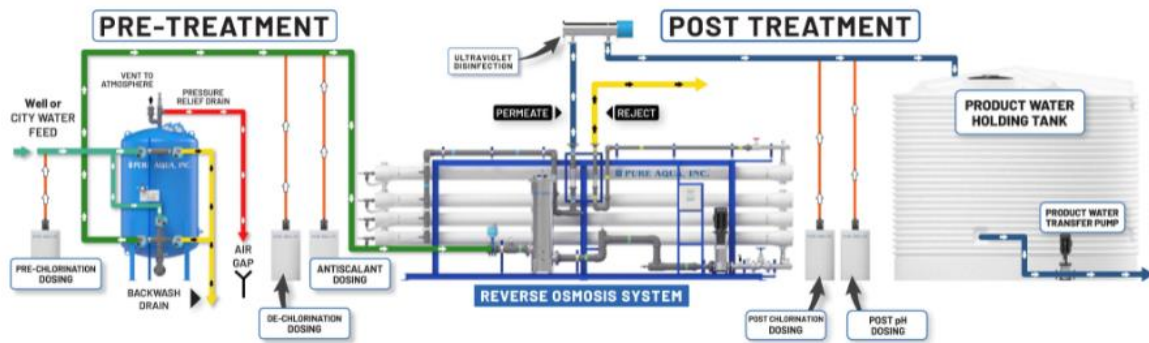


Figura 6 Ejemplo de un equipo industrial para el tratamiento de la dureza del agua por ósmosis inversa. (PureAqua, 2018)

El costo de un equipo de ósmosis inversa industrial depende de factores diversos como: la cantidad de agua a tratar por hora, el tratamiento previo al agua y/o calidad del agua, el sector para el que se vaya a utilizar, calidad, tamaño del equipo y marca, además de considerar el costo de mantenimiento e instalación. Pero en general los costos varían en un rango desde los más baratos (\$1,500 aprox.) hasta los de gama alta (+\$12,000). (Equipos Ósmosis Inversa, 2022)

Este equipo es muy utilizado para la eliminación de la dureza del agua ya que ofrece, además de expeler partículas grandes y en suspensión, la retención de iones y moléculas, garantizando la calidad del agua tratada. Ocupa poco espacio, es un proceso continuo y simple, además de ser rentable en el ámbito costo-beneficio (Moreno-Benavides, 2011). Como contraparte, no se recomienda el consumo humano del agua tratada con este equipo por la alta purificación que se le da, aunado a que se vuelve más ácida por el proceso que se tiene que seguir, asimismo es un proceso lento con alto rechazo de líquido con impurezas. (Bugeño, s/f)

Intercambio iónico

Un equipo de intercambio iónico consiste en columnas (normalmente dos, uno para retener aniones y otro para cationes), por las que se hace pasar el agua a tratar para que exista contacto con los sólidos (generalmente en forma de esferas de 0.5-1 mm de diámetro) que están en el interior de la columna (Reyna-Ávila, 2014), estos serán los responsables de intercambiar los iones indeseables por otros que no

representen problemas para el flujo (Ver fig. 7), entre los más comunes están el Na^+ , H^+ , Cl^- y el OH^- .

Los sólidos que se utilizan en estos equipos son carbón activado, zeolitas y principalmente resinas poliméricas, por ser un material moderadamente barato, con alta capacidad de intercambio, además de ser estable químicamente, durable y reutilizable (Nalco et al., 1989). La capacidad de intercambio iónico de una resina polimérica se debe a su volumen y cantidad de grupos funcionales disponibles. Estas se pueden regenerar fácilmente a través de su lavado con una solución concentrada del ion que se desea recuperar. (Larios et al., 2007)

La clasificación general de las resinas se da por el tipo de ion que traspasa. Las resinas catiónicas, como su nombre lo indica, intercambia cationes al tener una configuración con grupos funcionales ácidos; las resinas aniónicas retienen iones negativos al contar con un esqueleto con grupos funcionales básicos. A su vez estas se dividen en fuertes y débiles (Brand Industry, 2019).

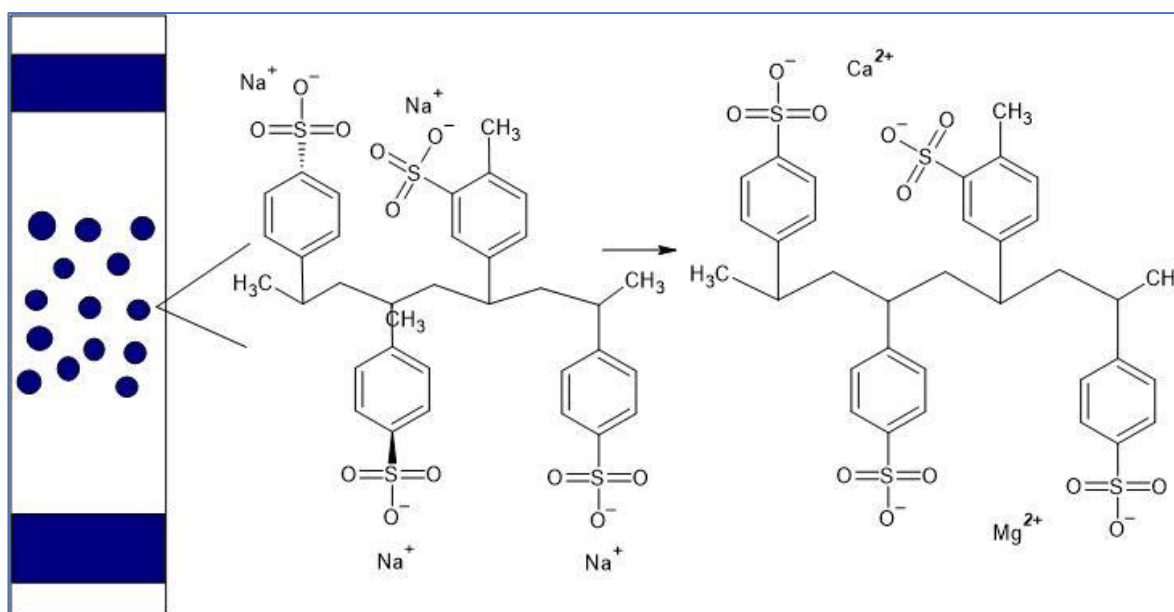


Figura 7 Proceso del tratamiento de la dureza del agua con un equipo de intercambio iónico. "Creado en ChemSketch Freeware"

Algunas de las ventajas que tiene el uso de un intercambiador iónico es que los sólidos tienen sitios de intercambio específicos para solo retener el ion que se requiere eliminar, además de ser una reacción rápida. Por el contrario, las

desventajas son que en presencia de residuos u otros contaminantes disminuye su eficacia, además los sólidos se deben limpiar cada cierto tiempo para evitar la saturación de la misma lo que disminuye su rendimiento. (Arriagada et al., 2001),

Comúnmente un equipo de intercambio iónico cuenta con una columna donde se lleva a cabo el intercambio de iones, sólidos de intercambio de iones, bomba y tanque de almacenamiento (Ver fig. 8).



Figura 8 Ejemplo de un equipo industrial para el tratamiento de la dureza del agua por intercambio iónico. (Equipos Ósmosis Inversa, 2022)

Electrodiálisis

Es un método para tratar la dureza del agua similar al de intercambio iónico, con la diferencia de que en este tratamiento se utilizan capas de membranas alternadas que dejan pasar únicamente a la carga opuesta (aniones o cationes), dependiendo del grupo funcional presente en su superficie. (Salamanca, 2016) Además, se emplean dos columnas donde se genera un proceso de óxido-reducción por la aplicación continua de corriente eléctrica, lo que origina de un lado un polo negativo (cátodo) y del otro uno positivo (ánodo). (Arriagada et al., 2001) Estos polos estarán

contrapuestos y en contacto con el flujo de alimentación, siendo la fuerza responsable del transporte de iones hacia los lados contrarios y de incentivar el paso por las membranas. (Ver fig. 9)

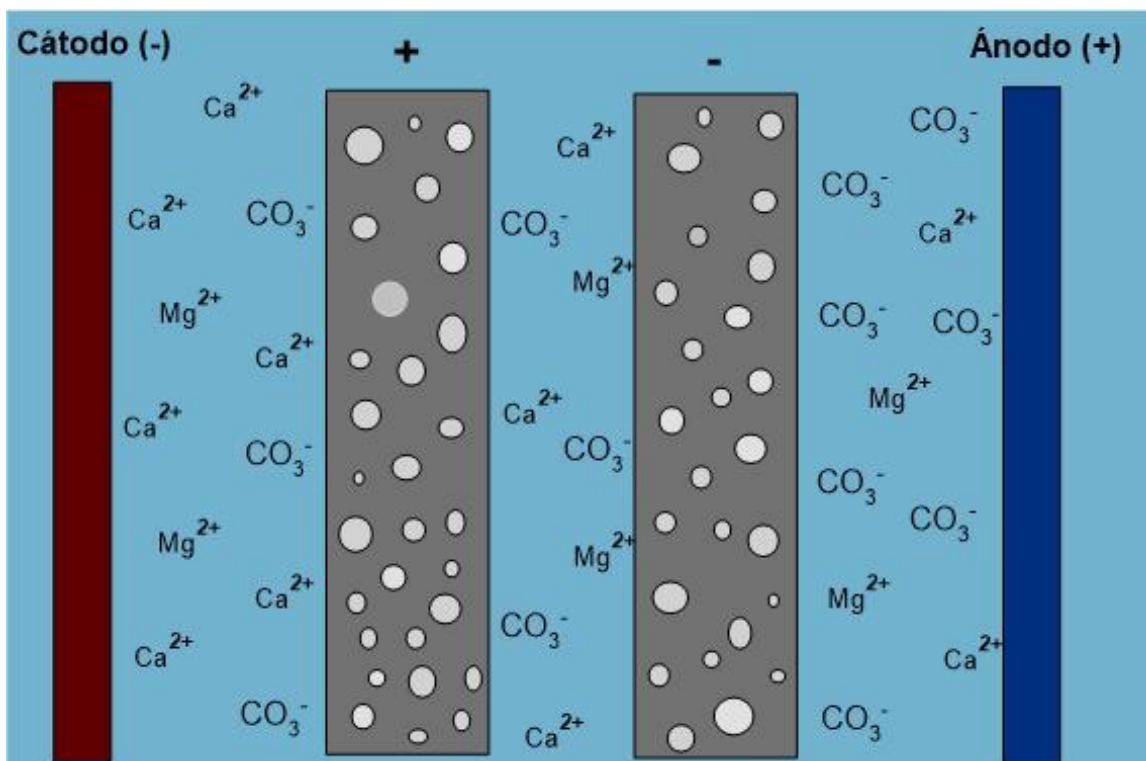


Figura 9 Proceso de tratamiento de la dureza del agua por electrodialisis. "Creado en ChemSketch Freeware."

Esta tecnología permite una eficaz separación de iones al generar dos corrientes, de un lado un flujo concentrado de residuos, y por el otro el flujo de agua ya tratada. (González-Campayo, 2020) Por la naturaleza del proceso muchas veces se requiere de soluciones que inhiban la síntesis preferencial de ciertos compuestos químicos, como carbonatos o sulfatos, ya que son contraproductos para el sistema, lo que puede prevenirse con la adición de ácidos o secuestrantes.

Las características de este equipo son una alta permeabilidad y selectividad dada por las membranas o resinas, buena conductividad, rendimiento estable, buena resistencia a ácidos, bases y oxidantes, es una operación simple, continua y de bajo costo. (Huisa, 2015). En contraste, los problemas que pueden presentarse son la solvatación de iones en la membrana, provocando obstrucciones y la disminución

de la eficiencia de la misma, requiere una cantidad alta de energía, necesita purificación previa y es requerida la ausencia de dióxido de carbono ya que puede modificar la conductividad del agua. (Bolívar, 2020)

Un equipo de electrodiálisis industrial (Ver fig. 10), consta de múltiples compartimientos (reactor electroquímico), a cada uno de estos se les llama celdas y consiste en una membrana, ya sea aniónica o catiónica, junto con un espaciado, que en conjunto se denominan módulo de electrodiálisis. Otro de los componentes son los electrodos que son la fuerza impulsora del proceso por aplicación de corriente eléctrica; redes de materiales poliméricos, situados en los espacios entre las membranas, que le dan turbulencia al fluido; y por último un distribuidor de flujo a la entrada y la salida de los compartimientos. (López-García, 2005)



Figura 10 Ejemplo de un equipo industrial de electrodiálisis. (Eboom Ya, 2022)

Nanofiltración (NF)

Es un proceso de filtración que se utiliza como intermediario de otros métodos de tratamiento del agua, normalmente entre la ultrafiltración y la ósmosis inversa, por el tamaño de los poros de las membranas que maneja. Por ser una tecnología de

filtración sigue prácticamente el mismo principio de funcionamiento que la ósmosis inversa y la ultrafiltración. Consiste en la aplicación de presión como fuerza promotora del movimiento del flujo de alimentación por una membrana altamente selectiva que retiene iones específicos, dejando solo pasar agua debido a su semipermeabilidad. (García et al., 2021). El mecanismo de selectividad de la membrana se desarrolla por impedimento estérico, tamaño entre moléculas y esencialmente por fuerzas intermoleculares. (Deratani et al., 2011)

Es la tecnología hasta ahora conocida, más eficiente para reducir la dureza del agua, debido a que la membrana nanoporosa que se utiliza es altamente afín a rechazar iones multivalentes como el Ca^{+2} , Mg^{+2} y Al^{+3} (Ward et al., 2021). Retiene partículas desde 0.01 a 0.001 μm . (Pérez et al, 2016). La gran mayoría de membranas para nanofiltración son de grupos alcalinos altamente estables, es por esto que se usan pocos polímeros por su resistencia al pH como las poliamidas aromáticas y polisulfonas (Schlackl et al., 2019). La capacidad de retención de la membrana dependerá en gran medida de la carga superficial de esta.

Considerando las desventajas de la nanofiltración, estas surgen ante todo en la membrana, la cual presenta con el tiempo y por la presencia de impurezas en el medio, ensuciamiento o bioensuciamiento lo que repercute en la deficiencia del proceso. Es por esto que la membrana tiene una corta vida de duración, ocasionando gastos para su regeneración o reemplazo. Aunado a lo dicho anteriormente, el proceso presenta una baja resistencia química y fallas en la retención de iones monovalentes, (García et al., 2021)

El sistema de nanofiltración trabaja con una presión de 5-40 bar, lo que lo hace un proceso eficiente por ser un parámetro de operación relativamente bajo comparado con el de otros equipos. Cuenta con tasas de recuperación de hasta el 85% (Calderón et al., 2012), permite el manejo de un alto flujo de alimentación, además de ser un proceso de moderada inversión y con bajos costos de mantenimiento y operación, al también ser compacto y ocupar poco espacio. En él se obtienen dos corrientes, uno de líquido permeado y el otro, un flujo de rechazo con concentrado de impurezas.

El equipo de nanofiltración (Ver fig. 11) consta de múltiples membranas tubulares, en espiral o planas, posicionadas de tal forma que al pasar al agua a tratar se genera un flujo cruzado donde, por un lado, el líquido permeado se reúne en un tubo colector de producto y por el otro se produce un canal de rechazo con el concentrado de iones. Algunos requisitos para su buen funcionamiento son ausencia de cloro en el medio, temperatura máxima entre los 40-50°C, presión máxima de 45 bar, rango de pH entre 3-10. (Puritec de México, 2019)



Figura 11 Ejemplo de un equipo industrial de nanofiltración. (PureAqua Inc., 2018)

Espectro de filtración

El espectro de filtración es una gráfica referente a los distintos rangos de tamaño de poro que puede tener una membrana utilizada para la filtración de partículas, es decir la capacidad de filtrado de un volumen de líquido, normalmente agua. Clasificando a partir de las macropartículas que se ven a simple vista, y pasando por el rango de la microfiltración (evita el paso de partículas en suspensión desde 1.0-0.1 μm de tamaño); la ultrafiltración que detiene macromoléculas de 0.1-0.01 μm ; la nanofiltración, impide la absorción de sales que van desde 0.01-0.001 μm , y hasta llegar a la ósmosis inversa que solo concede el paso de moléculas de agua. (Baute-García, 2017).

Para el fin de esta tesina, solo se hace mención de la técnica de nanofiltración y ósmosis inversa al ser las únicas con tamaño de membrana capaces de retener los

iones que forman el agua dura, el Ca^{+2} y Mg^{+2} . Sin embargo, la Micro y Ultrafiltración también son métodos importantes y muy utilizados para separar impurezas grandes, mayores de los $0.01 \mu m$. En la figura 12 se hace mención de algunas características de estas técnicas de filtración.

+	Macromoléculas	Filtración
1.0	Pigmentos, Bacterias, Polvo fino, Emulsiones, Sólidos suspendidos, etc.	Microfiltración
0.1	Proteínas, Carbon negro, Virus, Tabaco, Emulsiones, Gelatina, etc.	Ultrafiltración
0.01	Proteínas, Pirogenos, Virus, Tinte, Iones polivalentes, etc.	Nanofiltración
0.001	Sales acuosas, iones poli y monovalentes, radio atómico, Azúcar, Tinte, Pesticida, moléculas en general.	Ósmosis Inversa

Figura 12 Espectro de filtración. "Creado en ChemSketch Freeware". (Atias, 2018)

CAPÍTULO 2. MEMBRANAS

El capítulo dos de la presente tesina se divide en tres grandes temas, el primero de ellos “Definición de membrana” implica las descripciones del término, materiales de los que se puede fabricar, usos, características generales, y por último las ventajas y desventajas que presentan. En el tema dos denominado “Principio de funcionamiento de las membranas de filtración”, se detallan las variables de la membrana y el entorno que hacen posible la filtración, además se mencionan algunas fuerzas que son las responsables de la selectividad y capacidad de retención de la membrana. Por último, se nombran los factores que repercuten para que el proceso pierda su eficiencia.

Para el último y tercer tema de este capítulo, titulado “Clasificación de las membranas” se realiza una recopilación de algunas características por las que se pueden catalogar las membranas; dos que se retoman son por su estructura, en microscópica y macroscópica con sus derivados, y profundizando en la segunda clasificación de acuerdo al material con que están hechas.

La clasificación de acuerdo al material con que se fabrican abarca dos grandes ramas que se van desglosando, membranas “inorgánicas” con las propiedades que caracterizan a este tipo de estructuras, además de añadir ejemplos representativos de este grupo. La segunda rama es acerca de las membranas “orgánicas” donde se detallan sus características, ventajas y desventajas, y a la vez se describen las dos ramas que surgen de esta de acuerdo al origen del polímero a usar, esto es por su origen sintético o natural.

En la parte de los biopolímeros se hace énfasis en uno de los materiales con los que se trabaja en la tesina, el quitosano por lo que se detalla su estructura, origen y métodos de obtención, propiedades sobresalientes, inconvenientes, aplicaciones en áreas diversas y deteniéndose un poco en sus características como membrana en el tratamiento del agua, finalizando con algunos métodos de degradación. Por la parte de los polímeros sintéticos, se detalla con la misma secuencia que el quitosano al polipropileno.

Como último subtema del capítulo dos se hace mención de los beneficios y características de la hibridación de materiales poliméricos, junto con un apartado sobre los principios de la química verde. Finalmente se redacta una sección denominada “Membranas híbridas de polipropileno modificadas con monómeros de quitosano” donde se describe parte de la teoría que se aplicara en la presente tesis para la elaboración y aplicación de membranas híbridas de polipropileno y quitosano en la eliminación de la dureza del agua.

2.1 Definición y características de las membranas de filtración.

Una membrana es una estructura física multicapa hecha de materiales como polímeros, cerámicos o metales. Actúa como semi barrera por la presencia de poros en su estructura que permiten el paso selectivo de una sustancia deseable y retiene elementos que se desean eliminar de un flujo de alimentación (Benito et al., 2011). Esto se logra a través de la aplicación de una fuerza suficientemente capaz de incitar la separación, las más frecuentes son por una diferencia de presión o por la aplicación de electricidad. En el proceso de filtración existen dos flujos delimitados por la membrana, en primer lugar, el de alimentación con el concentrado de las impurezas a retener y en segundo, el flujo permeado con el disolvente puro.

Es una tecnología muy utilizada y por lo mismo en progreso, ya que además de ofrecer selectividad, es un proceso simple de fácil escalamiento, ecológico, con buena eficiencia, bajo consumo de energía y en general menos costoso comparado con otras técnicas de separación (Hazrati et al., 2018). En contraparte, tienen un tiempo de vida útil reducido que depende de la capacidad de saturación de la membrana, lo que genera cada cierto tiempo gastos para reemplazarla o regenerarla; así mismo el tiempo de filtración puede ser largo obedeciendo al grado de permeabilidad de la misma. (Ribeiro et al., 2007).

Sus aplicaciones son diversas en gran cantidad de áreas, pero en general se emplea la filtración con membranas para tratamiento y/o recuperación de contaminantes industriales y domésticos, así como también para aumentar la calidad del agua para su uso en proceso, como medio de enfriamiento o en transporte de calor (Escobar et al., 2012). Las membranas se utilizan en equipos

como el de ósmosis inversa, micro, ultra y nanofiltración además de la electrodialisis, donde el fin es purificar un líquido a través de la concentración y separación de partículas indeseables por un flujo secundario de retenidos.

La capacidad de retención de partículas de las membranas se basa en la composición química y estructural de la misma, el tamaño de los poros, la selectividad, grado de permeabilidad, características del flujo a tratar y las condiciones del proceso (Escobar et al., 2012). Se pueden utilizar las membranas por si solas o en arreglos con distintas configuraciones como en disposición de cartuchos, tipo placa-bastidor, tubular, enrollada en espiral o de fibra hueca.

Las características medibles de una membrana son su estructura química, composición, propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, físicas y químicas (Pérez et al., 2016). Por ello es importante obtener estos datos, para esto se utilizan técnicas de caracterización de membranas como la Microscopía Electrónica de Barrido, de fuerza atómica, Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier, foto electrónica de rayos X, entre muchos otros más, que se basan en el estudio de la superficie o en su estructura interna. Estas propiedades que caracterizan a una membrana se supeditan de la naturaleza fisicoquímica del polímero, además de la estructura y el método de funcionalización y/o síntesis de la misma.

2.2 Principio de funcionamiento de las membranas de filtración.

La presión que se necesita para incentivar el movimiento de un lado a otro de la membrana está en función del tamaño de los poros, donde entre más pequeños estos sean la presión requerida ira aumentando exponencialmente (Chacón-Villalobos, 2006). La diferencia de presión o en algunos casos también llamada “presión transmembranaria”, es la verdadera responsable del proceso de filtración con membranas y se manifiesta por la diferencia entre los valores de presión que presentan ambos lados de la membrana (García-Román, 2010). Además de la presión, factores como el caudal, la temperatura, la concentración y la estructura de la membrana son determinantes para obtener un permeado de calidad (Chacón-Villalobos, 2006).

El proceso de filtración con membranas inicia con la aplicación de una presión mayor a la osmótica en el flujo de alimentación “concentrado” (Benavides y Muvdi, 2014), el cual se hace pasar por un material poroso, que, dependiendo de sus características fisicoquímicas, seleccionará y atrapará los sólidos de acuerdo a su tamaño y naturaleza química (Orozco et al., 2019), dejando pasar el fluido libre de las impurezas objetivo.

Estas fuerzas intermoleculares que separan y atraen sólidos pueden ser de naturaleza electrostática (ejemplo ion-dipolo), por las llamadas fuerzas de Van der Waals (ejemplo dipolo-dipolo) (Bolívar, 2020), o por la formación de complejos. Como resultado la selectividad de una membrana depende de dichas fuerzas, además de los efectos dieléctricos, repulsión entre cargas y el efecto estérico (Pérez et al., 2016). Los factores que afectan la eficiencia de operación con membranas son el “ensuciamiento” por deposición de sólidos indeseables en la superficie y la polarización (García-Román, 2010).

2.3 Clasificación de las membranas.

Las membranas se pueden clasificar de acuerdo a muchas de sus propiedades, una de ellas por su estructura; ya sea macroscópica (laminares, tubulares, de fibra hueca) o microscópica, y esta segunda a la par por su porosidad (porosas o densas) o por su configuración (simétricas o asimétricas) (Paglieri y Way, 2002). Otra de las clasificaciones es de acuerdo a la naturaleza del material con que están fabricadas, pudiendo ser de materiales de origen inorgánico u orgánico, y este a su vez a partir de recursos renovables, de fuentes petroquímicas, o en base a mezclas de estos últimos dos.

Membranas inorgánicas

Las membranas inorgánicas son un campo de estudio muy explorado, principalmente con las membranas de origen cerámico, por sus características y usos. A pesar de ello no son muy aprovechadas por el simple hecho de que, a diferencia de las de origen orgánico, estas son por mucho más caras de producir y sobre todo a escala. Las muchas ventajas que ofrecen no son suficientes para que su uso sea una alternativa viable.

Se clasifican de dos formas, como porosas y no porosas. Entre las porosas se encuentran las zeolitas con tamaño de poro de escala nanométrica, su síntesis se puede llevar a cabo in situ o por crecimiento secundario. Las no porosas son una mezcla de dos fases, como puede ser cerámica y carbonato fundido, no obstante, ello les confiere una diferencia notoria entre selectividad mayor y baja permeabilidad, lo que no es práctico para muchas aplicaciones. (Cardona et al., 2021)

Las membranas inorgánicas tienen estructura de naturaleza metálica, cerámica o vítrea. Estos materiales en general, por ser estables químicamente, le confieren a la membrana propiedades como poca porosidad, excelente resistencia mecánica y a ataques de químicos agresivos, vapores, a altas temperaturas y presiones; y en general a condiciones extremas, esto les permite ser durables y por lo mismo tienen la capacidad de ser almacenadas (Benito et al., 2011). Entre las membranas inorgánicas más utilizadas están:

Zeolitas

La zeolita es un sólido de configuración definida por aluminosilicatos, los cuales son los encargados de captar los iones que se desean eliminar de una solución, cediendo aniones (principalmente ion Na^+). Su estructura definida le permite encerrar moléculas de diversos tamaños de acuerdo al tamaño de la abertura. Para regenerar la zeolita es necesario sumergirla en una solución con el ion que se desea recuperar. (Araújo y Rodrigues, 2012)

Cerámicas

Una membrana cerámica es un material sólido, formado de capas a base de materiales como óxidos metálicos (ejemplo la alúmina Al_2O_3 , dióxido de titanio TiO_2 y el circonio), o carburos (como el carburo de silicio (SiC)) (Benito et al., 2011). Las membranas cerámicas son duras, fuertes, selectivas, con vasta superficie de contacto, son conductivos térmicos y eléctricos, con tendencia baja de ensuciamiento. Así pues, se pueden manejar flujos altos de solución a tratar y con diversidad de contaminantes, esto permite destinar menos recursos en

mantenimiento (Misrar et al., 2017). Sin embargo, su complicada síntesis con temperaturas elevadas y alta fragilidad hacen que su uso sea limitado.

Membranas orgánicas

Las membranas orgánicas son estructuras poliméricas de monómeros a base de carbono, su origen puede ser natural o en un laboratorio (Guizard, 1999). Por tal motivo se clasifica en biopolímeros y polímeros sintéticos, con una sub variante originada por la mezcla de ambos llamados híbridos. Son membranas muy utilizadas e investigadas por ser económicamente viables y en algunos casos amigables con el medio ambiente.

Entre sus ventajas destacan su capacidad de tener más superficie de contacto por unidad de volumen, estabilidad, son de fácil síntesis y con alta disponibilidad, debido a su posibilidad de ser fabricados a escala en variedad de tamaños, asimismo son de práctica instalación. Por el contrario, sus desventajas están alrededor de su nula resistencia a cambios extremos fisicoquímicos de su entorno, como de pH, temperatura, presión, ataque de bacterias, agua o sustancias corrosivas, entre otros (Herrera-Cerecero, 2020). Por estas razones cuentan con un tiempo de vida limitado y no son aptos para almacenamiento.

Son membranas con pocas ventajas a diferencia de las membranas inorgánicas, es por esto que se ha fomentado su estudio para mejorar sus propiedades y hacerlas más factibles, ejemplo de ello con la síntesis de nuevos materiales poliméricos más resistentes. Para solucionar este problema también se han creado técnicas de funcionalización de membranas como la funcionalización por plasma, reacciones de injerto, recubrimientos o autoensamblaje, los que permiten sintetizar estructuras de copolímeros con mejores propiedades.

Membranas a partir de biopolímeros.

Los biopolímeros son largas cadenas de carbono, lineales o ramificadas, sintetizadas por organismos vivos en la naturaleza (plantas, bacterias, organismos marinos, animales, entre otros.) (Pérez-Rodríguez, 2010); por lo tanto, las

membranas hechas a partir de biopolímeros son sólidos multicapa de dichas estructuras.

Los biopolímeros pueden tener distintas propiedades fisicoquímicas de acuerdo a la composición de los mismos, pero en general cuentan con características como su compatibilidad con otros polímeros, lo que los hace idóneos para ser acoplados a otras estructuras mejorando así sus propiedades, no son tóxicos (Sánchez et al., 2016), poseen buenas cualidades mecánicas, son estables, selectivos, duraderos, versátiles, algunos son termoplásticos, y adicionalmente la mayoría provienen de recursos renovables, lo que los hace biodegradables. (Pérez-Rodríguez, 2010)

Son materiales cada vez más investigados por la tendencia creciente de hacer más biodegradables los materiales, impactando lo menos posible en el medio ambiente, siendo así que se necesitan superar sus desventajas tales como su baja eficiencia de producción, altos costos de obtención, fragilidad, baja estabilidad y en general varias de sus propiedades fisicoquímicas (Rodríguez et al., 2021), dependiendo del uso que se le quiera dar. Entre los biopolímeros más utilizados para la obtención de membranas están la celulosa y el quitosano.

Celulosa

La celulosa es un biopolímero muy utilizado en diversos ámbitos por ser el más abundante de la naturaleza, está basado en cadenas lineales de β -glucosa. Las membranas de este material están hechas a partir de ésteres de celulosa (Valero et al., 2013). Sus principales ventajas son su elevado rechazo a las sales, termoplasticidad, estructura resistente y alta permeabilidad al agua, como inconvenientes presenta inestabilidad, trabajando solo bajo ciertas condiciones, como ausencia de bacterias y disolventes orgánicos, rango limitado de pH (3-8), temperaturas de operación bajas ($<50^{\circ}\text{C}$) y disminución de su eficiencia con el paso del tiempo. (Baute-García, 2017)

Quitosano

El quitosano es un biopolímero bastante abundante en la naturaleza, por lo que su fácil obtención lo hace objeto de múltiples estudios para explotar y aumentar sus aplicaciones. De nomenclatura química β (1,4), -2 - amino - 2 - desoxi - D -

glucosa (Hernández et al., 2005), es una macromolécula lineal conformada por múltiples monómeros de D-Glucosamina, unidos por enlaces β (1,4) (Navarro et al., 2010) (Ver fig. 13). Se puede obtener por métodos enzimáticos o físico-químicos a partir del carbohidrato quitina, presente en paredes celulares de algunos hongos y levaduras, en exoesqueletos de artrópodos (como camarones, langostas, zooplánctones y cangrejos), en las alas de algunos insectos y en los órganos de ciertos animales. (Hernández, 2004)

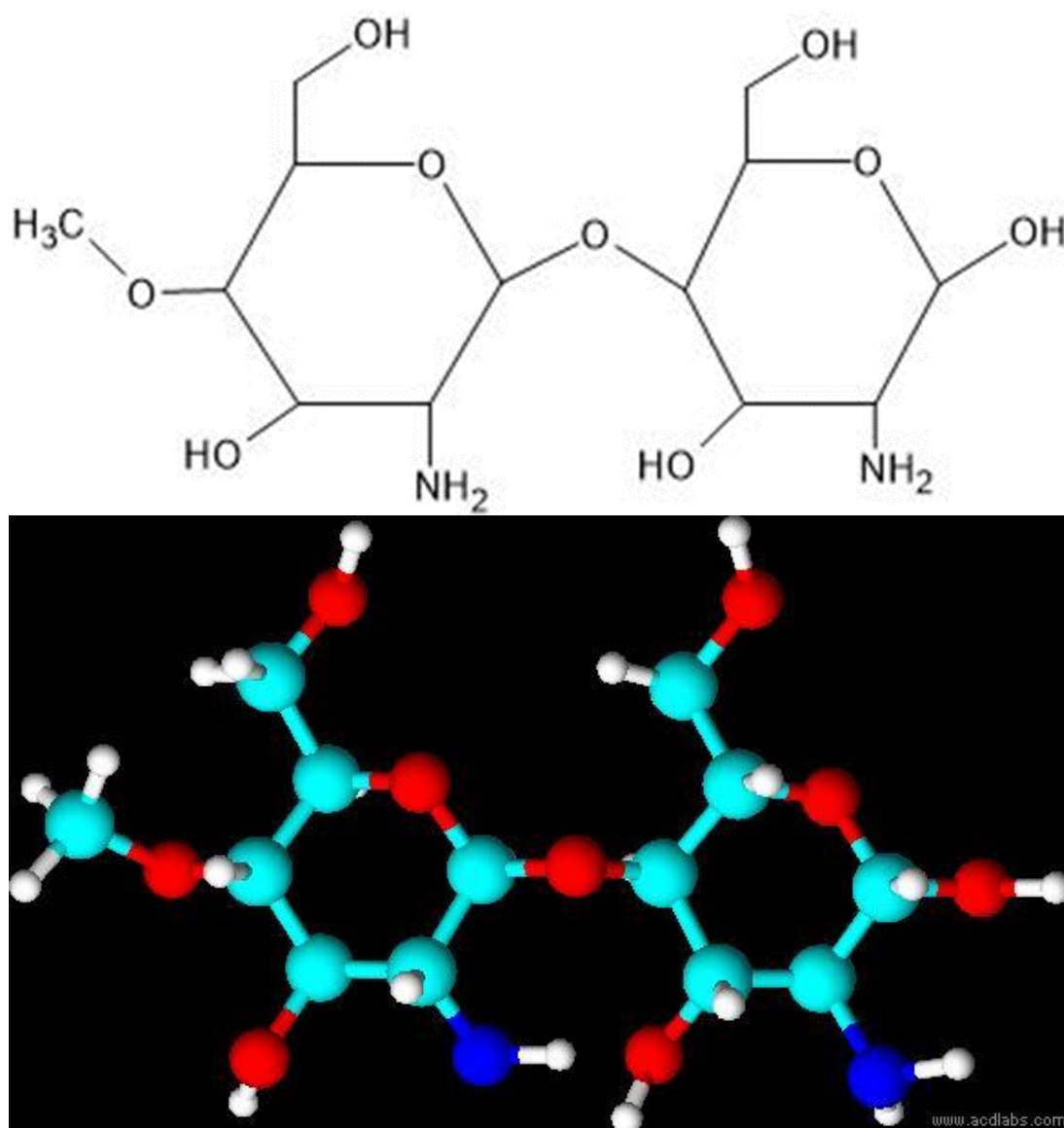


Figura 13 Estructura química del quitosano. "Creado en ChemSketch Freeware"

Su estructura cristalina y compacta, composición y origen le confieren propiedades como biodegradabilidad, biocompatibilidad, carácter antimicrobiano, inocuidad, tiene capacidad como adherente, actividad inmunoestimulante, proviene de fuentes renovables, y es permeable (Pacheco-López, 2010). En contraparte, las desventajas que presenta dependen de su origen, método de extracción y de la desacetilación de la quitina (Águila et al., 2019), presentando viscosidad en medio ácido, insolubilidad en agua, degradación a largo plazo, fragilidad, sensibilidad a valores de pH ácidos, escasas propiedades mecánicas, poca porosidad, baja resistencia térmica y a la humedad, además de altos costos de obtención (Pellis et al., 2022).

A pesar de las deficiencias que presenta el quitosano, sus asombrosas cualidades se intentan explotar. Por esta razón tiene aplicaciones en infinidad de áreas como en la Biomedicina donde se utiliza como matriz en medicina regenerativa, anticoagulante, cicatrizante, bactericida, y por ello en la fabricación de gasas, vendajes, suturas quirúrgicas, cremas, lentes de contacto, hidrogeles, entre otros. Además, destaca como material de transporte de medicamentos y material genético. (Romero y Pereira, 2020)

Otro sector donde se emplea es en la industria alimenticia, en la fabricación de envolturas para alimentos, especialmente perecederos, como conservador y aditivo alimenticio. En la agricultura, se maneja como componente de fertilizantes para permitir una liberación controlada de ingredientes activos, además de emplearse como agente bactericida y fungicida en las plantaciones (Lárez-Velásquez, 2006). En la industria cosmética, se aprovecha como bactericida para productos corporales como el jabón, champú, cremas, pasta dental, etc., también ayuda en el tratamiento de enfermedades de la piel como el acné, funciona como anticaspa, anti-frizz e hidratante. (Bauer et al., 2022)

Una aplicación especial que tiene el quitosano es en el tratamiento del agua, debido a la presencia del grupo amino el quitosano cuenta con una carga positiva lo que le permite ser utilizado como coagulante primario y floculante en la eliminación de la turbidez del agua (Bautista et al., 2005). Aunado a ello, su aplicación más notable

es en la elaboración de membranas para la purificación o desmineralización del agua.

Su capacidad de asociación con metales u otros polímeros dada por sus grupos funcionales libres amino e hidroxilo, además de su alto peso molecular le permiten tener una alta selectividad y con ello la capacidad de formar complejos, siendo un muy buen material para la fabricación de membranas (Ariadi et al., 2020). Los grupos amino pueden interaccionar con otros iones de diversas maneras como por quelación, intercambio iónico, formación de enlaces e interacciones electrostáticas. (Eun Park et al., 2022)

Para superar las desventajas del quitosano como membrana, manteniendo sus buenas cualidades, se llevan a cabo reacciones de copolimerización con estructuras que cuentan con mejores propiedades mecánicas, térmicas y químicas como los polímeros sintéticos, mejorando así su permeabilidad, estabilidad química y resistencia al ensuciamiento (Khoerunnisa et al., 2018).

En la degradación de moléculas de quitosano se obtienen residuos amigables con el medio ambiente, sin embargo, es un proceso tardado que depende de la pureza y cristalinidad del material, algunos métodos utilizados son: degradación enzimática por enzimas quitosanasas, degradación térmica usando fuentes de calor, química con el uso de sustancias agresivas como ácidos o bases, o empleando métodos físicos como la irradiación y el ultrasonido. (Águila et al, 2019)

Membranas a partir de polímeros sintéticos

Otra área de estudio de las membranas orgánicas son las fabricadas a partir de polímeros de origen sintético. Estos polímeros son los más utilizados actualmente por sus múltiples beneficios, destacando su bajo costo de obtención, sin embargo, se necesita limitar su uso o mejorar sus propiedades, principalmente de degradación, por ser un material muy contaminante y bastante difícil de destruir sin generar más daño en el medio ambiente (Ruiz-Avilés, 2006).

Su origen es a partir de su síntesis en un laboratorio o por procesos industriales como la refinación de petróleo (Barrera et al., 2013). Las principales características

de los materiales a base del petróleo son su alta resistencia mecánica y química, estabilidad térmica, durabilidad, además de ser prácticos de trabajar, inertes y versátiles. (Valero et al., 2013). En contraparte no soportan la compactación, los medios clorados, son altamente inflamables y durables, costosos de degradar o reutilizar y con baja resistencia a altas temperaturas (Solares, 2013).

Poliamida

La poliamida es un polímero con enlaces de tipo amida. Las membranas sintetizadas a partir de poliamidas presentan altas propiedades de absorción, es por ello que algunas veces no logran ser tan selectivas dejando pasar algunos iones que se desean eliminar. A pesar de ello su uso es muy común en procesos como la microfiltración y ultrafiltración (Poletto et al., 2012). Son membranas con resistencia térmica y química, son altamente permeables, selectivas, e hidrofílicas, además de que operan a bajas presiones. En oposición, es susceptible a la degradación y más en la presencia de componentes clorados. (Ayala et al., 2006)

Polipropileno

El polipropileno es un subproducto de la refinación de petróleo y de la producción de etileno; consiste en unidades repetitivas del monómero propileno (Ver fig. 14). Por su versatilidad y bajos costos de obtención es uno de los termoplásticos semicristalinos más utilizados a escala industrial. (Amaya et al., 2018)

La estructura y distribución química del polipropileno le confieren características como dureza, resistencia mecánica (principalmente al desgaste), a productos químicos, y al calor, durabilidad, compatibilidad química, hidrofobicidad, además de ser inerte, antiincrustante y contar con propiedades antimicrobianas (Hazrati et al., 2018); siendo que en general posee excelentes propiedades intrínsecas. Por el contrario, sus desventajas son su alta inflamabilidad, baja humectabilidad, no es biocompatible, es un material muy contaminante y tiene tendencia al envejecimiento y oxidación por diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético, específicamente por los rayos UV (Tovar, 2021).

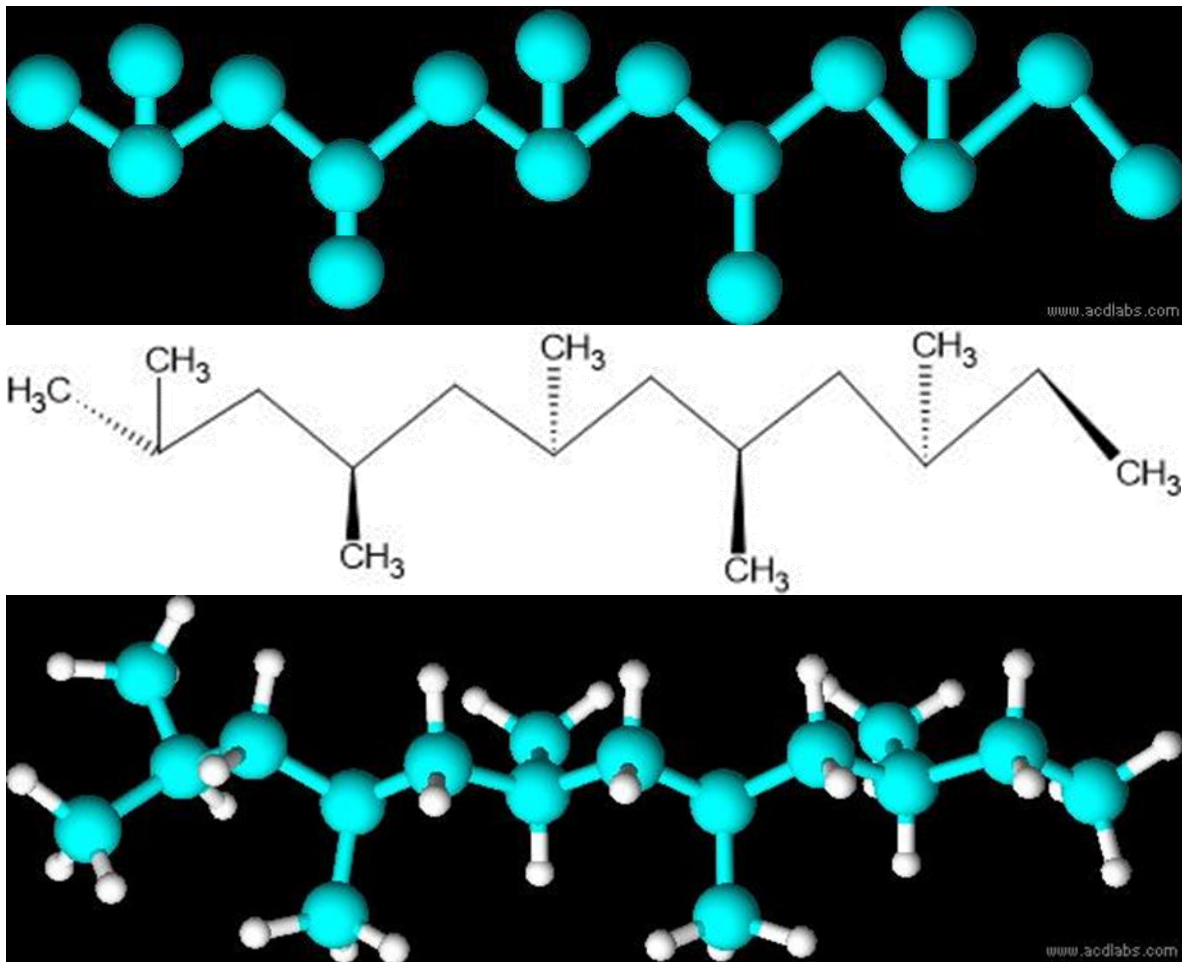


Figura 14 Estructura química del polipropileno. "Creado en ChemSketch Freeware"

Dicho polímero es utilizado en diversas áreas como en la industria alimentaria, esencialmente en la producción de recipientes o contenedores plásticos. (Corso et al., 2016). En la industria química y farmacéutica, con la fabricación de enseres domésticos, juguetes, partes de automóviles, tuberías, instrumentos de laboratorio, accesorios médicos, aislantes de estructuras de edificios, cableado, artículos eléctricos y electrónicos, entre otros. (Caicedo et al., 2017). Asimismo, en la industria textil en la fabricación de fibras para textiles, alfombras, tapetes, ropa, cintas, cuerdas, productos higiénicos desechables, etc. (Corso et al., 2016)

Otra de las áreas donde se utiliza el polipropileno es en el tratamiento del agua, donde se utiliza en particular en la síntesis de membranas de filtración. La estructura de polipropileno más utilizada en la fabricación de membranas es la isotáctica (Ver

fig. 15) debido a su alta resistencia y capacidad de disolverse con gran variedad de solventes a altas temperaturas, mayores de 80°C. (Himma et al., 2016).

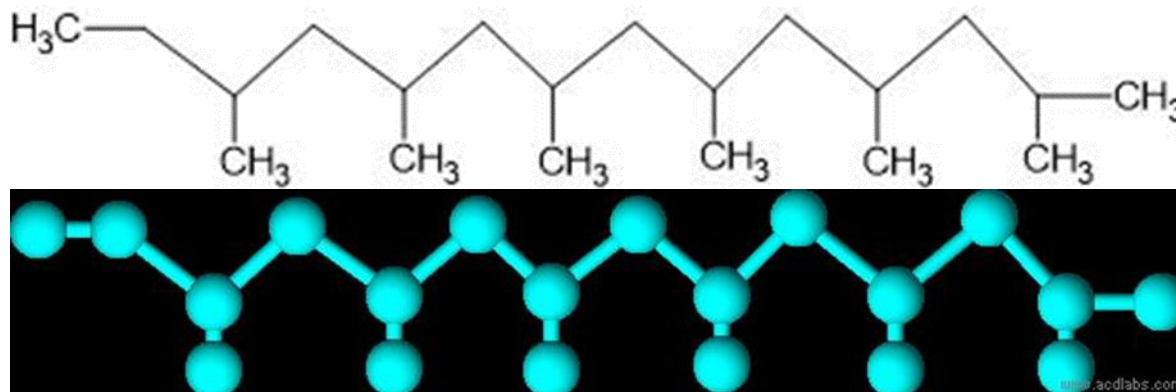


Figura 15 Estructura química del polipropileno isotáctico. "Creado en ChemSketch Freeware"

Por las características hidrofóbicas y antiincrustantes del polipropileno es que permite el paso de moléculas polares como el agua, por ello es muy utilizado como esqueleto de membranas, sin embargo, para mejorar su rendimiento y propiedades de retención es necesario introducirle grupos funcionales en la superficie que permitan la captura de moléculas específicas.

La degradación de este material es complicada por la estabilidad de sus enlaces, es por ello que se modifican con monómeros que permiten una rápida degradación. Los residuos de componentes sintéticos son sustancias tóxicas y/o muy contaminantes para el medio ambiente, es por ello que se buscan alternativas más limpias de degradación como la enzimática, sin embargo, actualmente otras técnicas son más utilizadas como la degradación térmica, oxidativa, fotodegradación, etc. (Labeaga, 2018)

Membranas a partir de mezclas (materiales híbridos)

Como se mencionó anteriormente, las mejores virtudes que posee un biopolímero son su capacidad de biodegradación rápida y abundancia en la naturaleza, en contraste sus peores cualidades son su fragilidad y baja resistencia al calor. Por su parte, los polímeros sintéticos son de inferior costo, con buenas propiedades mecánicas y térmicas, pero en su caso provienen de recursos no renovables y su alta resistencia los hace ser bastante perdurables y altamente contaminantes. Su mezcla permite obtener materiales híbridos con las mejores características de ambos (Rodríguez y Orrego, 2016), cumpliendo con los principios de la química verde.

Principios de la química verde.

Con la gran importancia hoy en día de generar productos cada vez menos contaminantes para el medio ambiente, se han creado iniciativas para estimular que las siguientes generaciones se concienticen y redoblen los esfuerzos por apuntar a materiales más sostenibles en un futuro cercano, además de hacer algo con los contaminantes ya existentes, es por ello que se han englobado 12 de los principios fundamentales para hacer una química verde (Ver fig. 16) (Sierra et al., 2014). Siguiendo estos principios se realizan modificaciones en materiales para obtener mejores características, afectando lo mínimo al medio ambiente.

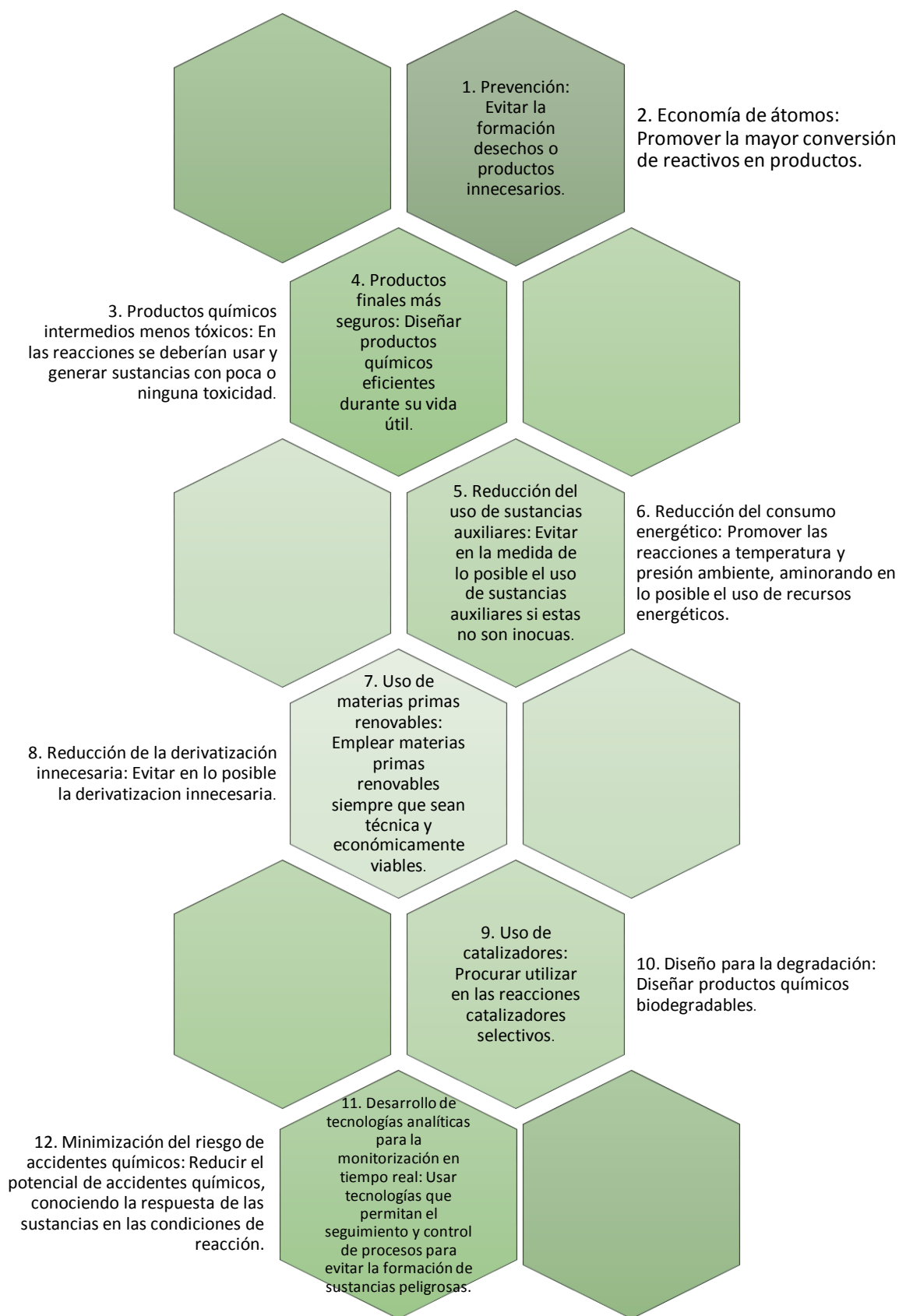


Figura 16 Principios de la química verde. (Anastas y Eghbali, 2010)

Membranas híbridas de polipropileno modificadas con monómeros de quitosano.

El agua con ciertos límites de calidad es requerida para variedad de aplicaciones y áreas, por lo que la filtración por membranas es una buena alternativa y de bajo costo comparado con otras técnicas. Las membranas poliméricas para filtración dominan el mercado por su facilidad de producción a gran escala y bajos costos de obtención (García, 2015). Es por ello que las características principales que se buscan mejorar para que la filtración con membranas sea más eficiente son la permeabilidad (productividad) y la selectividad (eficiencia) (Thankam et al., 2022). Estas dos dependerán, de entre otras variables, las condiciones de reacción dadas por el método de funcionalización usado, la concentración de ambos polímeros, estructura, distribución y el tiempo de reacción (Adamczak et al., 2019).

Las deficiencias que presentan las membranas fabricadas de un solo material pueden ser superadas con la hibridación de dos materiales puros compatibles, aún mejor si se trata de polímeros sintéticos con naturales por las excelentes propiedades mecánicas del primero y la capacidad de biodegradación del segundo. Con la funcionalización de polímeros sintéticos con naturales se adquieren materiales con propiedades intermedias, es decir de bajos costos, mayor biodegradabilidad, no tóxicos ni frágiles, con mayor selectividad y permeabilidad, además de contar con buenas características mecánicas y térmicas. (Rodríguez y Orrego, 2016)

Para la formación de copolímeros en la superficie de una membrana se utilizan diversos métodos como la funcionalización química, usando plasma o reacciones de injerto que fomentan la formación de enlaces más estables entre ambos polímeros. O por otro lado la funcionalización física a través de técnicas como el revestimiento y autoensamblaje, estas últimas no son muy utilizadas al ser solo interacciones electrostáticas entre iones y por lo tanto ser inestables.

La copolimerización por injerto con irradiación UV es una técnica de funcionalización química que permite controlar la longitud y posición del polímero a introducir en una

superficie, con la adecuada selección de la intensidad de emisión y longitud de onda, además de ser una metodología simple, que permite el uso de reactivos de bajo costo, siendo ecológica (García, 2015). Solo se requieren tres componentes en general: un monómero polimerizable, un polímero como esqueleto y un iniciador.

Por ese lado, las membranas de polipropileno han sido ampliamente estudiadas por las ventajas que ofrecen como soporte, donde solo se modifican las propiedades superficiales al introducir grupos funcionales específicos, como el quitosano, que mejoran el rendimiento, selectividad y degradación de la membrana, manteniendo la resistencia y durabilidad por la estructura de polipropileno. (Hernández et al., 2016)

La inserción de moléculas grandes como el quitosano en una membrana de polipropileno permite la reducción del tamaño de los poros, además de la adición de cargas eléctricas que inducen la formación de complejos, donde la finalidad es retener diferentes moléculas que se desean eliminar de un flujo de alimentación, dejando pasar otras moléculas de menor interés como el agua. Las aminas e hidroxilos presentes en el quitosano son los encargados de atraer por fuerzas electrostáticas o de coordinación iones metálicos, atrapándolos al ser grupos quelantes. (Alsuhybani et al., 2020)

Por este lado, como intermediario en la unión de una cadena de polipropileno y otra de quitosano, se requiere utilizar un enlazante en este caso el ácido acrílico, por los beneficios que aporta a la membrana como quelante. Además de lo anterior, permite alargar la cadena e introducir grupos funcionales más grandes como el quitosano mediante una polimerización controlada (Caro-León et al., 2019), aumentando la capacidad de adsorción de iones. Esto debido a que la molécula de quitosano cargada positivamente, tiene la facilidad de unirse con moléculas aniónicas como el ácido acrílico.

El equilibrio de formación de un complejo metal- polímero se da por la creación de un enlace coordinado entre ambos, con la donación de un par de electrones de parte del polímero al metal, donde el polímero o ligando se comporta como una base de Lewis o donante de electrones, y el ion metálico como un ácido de Lewis o aceptor

de electrones. Los ligandos pueden unirse al metal en una o varias posiciones dependiendo de si tienen uno (mono dentado) o varios átomos donantes (polidentados o también llamados quelatos). (Chang, 2002)

La creación de complejos de coordinación se puede considerar como una reacción ácido-base, es por ello que para predecir su formación se puede utilizar el principio de Ralph G. Pearson ABDB. En este principio categorizó ácidos y bases en duras, blandas e intermedias, y estableció que ácidos blandos tienen más afinidad por reaccionar y formar enlaces covalentes con bases blandas, y que con la misma tendencia los ácidos duros se enlazan electrostáticamente con bases duras (Douglas, 1994). Usando dicho principio se localizaron los ligandos y metales utilizados en la presente tesina para predecir su formación.

Tabla 3 Clasificación de ácidos y bases duras. (Douglas, 1994)

Ácidos duros	Bases Duras
$H^+, Li^+, Na^+, K^+, Be^{+2}, Mg^{+2}, Ca^{+2}, Sr^{+2}$	$O^{-2}, OH^-, F^-, Cl^-, CO_3^{-2}, NO_3^-, CH_3CO_2^-, PO_4^{-3}, SO_4^{-2}, ClO_4^-, H_2O, ROH, RO^-, R_2O, NH_3, RNH_2, N_2H_4$

Con la modificación de membranas de polipropileno con quitosano se busca obtener un mejor rendimiento e incrementar sus aplicaciones, como por ejemplo en el tratamiento de la dureza del agua. Otra ventaja de la introducción de monómeros hidrofílicos en superficies de membranas es que estos permiten la penetración de hongos y bacterias que consumen las cadenas poliméricas más fácilmente, aumentando su degradabilidad (Hernández y Gómez, 2017).

Aplicaciones del polipropileno y quitosano:

Las membranas de polipropileno y quitosano han sido estudiadas ampliamente y registradas en artículos como el de Cimbru (2022) “pH and pCl Operational Parameters in Some Metallic Ions Separation with Composite Chitosan/Sulfonated Polyether Ether Ketone/Polypropylene Hollow Fibers Membranes” e inclusive en

tesis como la de Ferreira (2011) “Telas de polipropileno revestidas por quitosana/polietilenoglicol na ocorrência de aderências peritoneais: Estudo experimental em ratas”, demostrando que membranas de polipropileno y quitosano son utilizados para diversas áreas y fines. Ejemplo de ello, en el área médica con la regeneración ósea y liberación controlada de medicamentos, y en el sector de tratamiento del agua con la eliminación de impurezas o iones; punto de enfoque de esta tesina.

CAPÍTULO 3. FUNCIONALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MEMBRANAS

El capítulo 3 se divide en cuatro temas principales. El primero versa sobre técnicas de funcionalización de superficies de materiales, segmentándolos en métodos de modificación químicos y físicos, donde en este último, al no ser vital para el desarrollo de la tesina, solo se da una generalidad del tema. El enfoque central del primer tema del capítulo tres sobre funcionalización de membranas poliméricas se da en las técnicas de modificación química, haciendo un bosquejo más detallado de las características de las metodologías por plasma y las diferentes versiones de las reacciones de injerto.

El segundo tópico para el capítulo tres se titula “Formas de unión entre superficie-ion.”, donde se mencionan algunas de las fuerzas que permiten la interacción entre moléculas, para retenerlas y así no dejarlas pasar por la membrana. Por la parte de las fuerzas intermoleculares se referencian las fuerzas electrostáticas y las de Van der Waals con sus respectivas categorías. Por último, por la parte de las fuerzas intramoleculares se citan las reacciones de formación de complejos.

El título del tercer tema es “Caracterización de membranas” donde se describen diversos métodos conocidos para obtener imágenes y datos fisicoquímicos de la estructura de membranas, entre estos la composición química, información cristalográfica y morfológica, propiedades mecánicas, eléctricas, etc., de muestras sólidas, líquidas o gases, orgánicos o inorgánicos. Todo ello con la descripción de algunas técnicas como la Microscopía Electrónica de Barrido, Microscopía de Fuerza Atómica, Espectroscopia foto electrónica de rayos X, Reflectancia total atenuada y Espectroscopia de Infrarrojo, por mencionar algunos, además de dos técnicas combinadas.

En la sección cuatro del presente capítulo se hace mención sobre “Métodos de degradación de polímeros”, donde se explican los principios de degradación biológica a través de enzimas, térmica con la aplicación de calor, química con la presencia de reactivos químicos, mecánica por acción de fuerzas como el

ultrasonido y temperaturas criogénicas y, por último, la radiación con técnicas como la foto degradación.

3.1 Técnicas de funcionalización de membranas poliméricas.

Una técnica de funcionalización es un proceso para insertar grupos funcionales específicos en la superficie de materiales como las membranas, a través del rompimiento y formación de fuerzas intramoleculares, y con la obtención de copolímeros que mantienen la estructura del material de soporte, pero adquieren propiedades físico-químicas del monómero insertado (Santiago, 2016), como paso esencial se debe incitar la activación de las moléculas presentes en el ambiente o de la membrana para iniciar con el tratamiento. Actualmente existen varios métodos para conseguir la funcionalización de una membrana, algunos de los más representativos se describen a continuación.

Métodos de modificación química

Funcionalización por plasma

La funcionalización por plasma es un método donde se utiliza corriente eléctrica para propiciar un ambiente con múltiples cargas; electrones, protones, neutrones, radicales, fotones y en general iones, a partir de un gas (Hernández-Hernández, 2011). A esta manera de generar plasma se le conoce como descarga luminiscente eléctrica, donde se genera una descarga luminosa propiciando la colisión entre moléculas y generando partículas cada vez más reactivas que pueden iniciar reacciones en cadena (Functional Surfaces B3, 2013). Gracias a este principio se pueden modificar superficies como resultado de la interacción entre superficie-grupo funcional.

Dicho método tiene múltiples beneficios, algunos de los cuales son que es una técnica rápida, económica, permite modificar gran variedad de materiales, se trabaja a temperaturas medidas, no requiere el uso de sustancias auxiliares, por lo que se generan pocos contaminantes, además de que es un método eficiente al obtener una superficie donde prácticamente todas las paredes de contacto se modifican, ya que el plasma penetra los poros del material (García-Tsai et al., 2012). Por otro lado,

la gran desventaja de utilizar este tipo de mecanismo es que no se puede tener un control sobre las reacciones generadas, pero esto se ha ido superando valiéndose de procedimientos alternativos.

Dos de las técnicas de modificación de membrana por plasma son: por injerto de grupos funcionales y por polimerización. El procedimiento de injerto de moléculas puede hacerse por dos vías; el primero creando radicales libres a partir gases (Ne, F₂, N₂, etc.), que con la eliminación de hidrógenos o dobles enlaces se adicionan a la cadena, la segunda manera es a partir de la activación de la superficie para injerto de grupos funcionales, donde a partir del plasma se forman radicales libres en el polímero de la superficie de la membrana y estos son los encargados de atacar la molécula a incorporar (Martínez, 2005).

La polimerización con plasma es la otra técnica para añadir grupos funcionales a una superficie, con la diferencia de que en este se propicia un entorno donde los monómeros en el gas se polimerizan entre sí y a la vez se adicionan a la superficie provocando un recubrimiento total del material (Functional Surfaces B4, 2013). En todos estos casos es necesario tomar en cuenta criterios como el tiempo, la presión en la cámara, la potencia de descarga y la compatibilidad entre reactivos.

Funcionalización por reacciones de injerto (grafting)

Esta es una técnica de adición de grupos funcionales específicos a superficies uno a uno por vía radicalaria; adicional muestra buena estabilidad por los enlaces covalentes presentes. Permite control y precisión en la formación del copolímero sin alterar la estructura interna del sustrato. Este método requiere de cuatro elementos principales para llevarse a cabo, el sustrato a modificar, monómero a injertar, iniciador y el medio (Contreras, 2015). En general se divide en dos rutas de síntesis, grafting from y grafting to.

Grafting from, consiste en la formación de radicales en la superficie del material con la ayuda de un iniciador de polimerización, lo que permite la posterior adición y crecimiento del polímero de interés (Morales-Balado, 1998). Por su parte en el mecanismo grafting to primero se hace crecer la cadena del polímero a injertar y

posteriormente se une a la superficie del material (Contreras, 2014). Cada uno a la vez, por la naturaleza del mecanismo de inserción del polímero al sustrato, se clasifican de dos formas: injerto al azar y controlado.

Injerto al azar

Como su nombre lo dice, en el injerto al azar no se tiene un control específico sobre la adición del monómero al sustrato. Simultáneamente este mecanismo se encuentra clasificado de acuerdo a la fuente con que se inicia el proceso, los cuales son:

Reacciones de foto injerto:

La fuente de energía proviene del espectro UV, es una técnica muy utilizada por su baja inversión y alta eficiencia, especialmente a escala industrial. La reacción inicia con irradiación UV, energía que es absorbida por foto iniciadores, es decir grupos funcionales con dobles o triples enlaces y anillos aromáticos, y que provoca el rompimiento y activación del mismo, este grupo provoca la formación de sitios activos ya sea en el monómero a injertar o en la superficie del sustrato, lo que estimula la inserción del monómero en la superficie. (UPV, 2013)

Es un proceso relativamente sencillo, además de que no se modifican las características físico-químicas del monómero a injertar. Uno de los grupos más utilizado como foto iniciador es la benzofenona, ya que permite un rendimiento de casi el 100%.

Reacciones térmicas

Similar al proceso de foto injerto, la molécula iniciadora se rompe debido a que el medio donde se encuentra se somete a altas temperaturas, la formación de estos radicales propicia la formación de otros radicales, ya sea en el monómero a injertar, en la superficie del material a modificar o en ambos, incentivando la adición del monómero en la superficie del material (Contreras, 2015). Los iniciadores térmicos más usados son el peróxido de benzoílo y azoisobutilonitrilo.

Injerto controlado

Un tratamiento químico controlado requiere de un medio donde existan especies que equilibren la activación y desactivación de radicales para obtener estructuras definidas. Aunado a esto es necesario cumplir mínimo con tres condiciones: una reacción donde la etapa de iniciación sea más rápida que la de propagación para tener reacciones simultáneas, la mínima formación de radicales libres en crecimiento tanto como sea posible y por último un intercambio rápido entre especies activas y durmientes, preferenciando las segundas (Contreras, 2015). Algunas de las técnicas de polimerización controlada más comunes son:

Polimerización Radicalaria por Transferencia de Átomo (ATRP)

La ATRP es una técnica de control del crecimiento de cadenas de monómeros, para esto deben existir en el medio cuatro elementos importantes, monómero vinílico, iniciador (haluros de alquilo), catalizador (complejos organometálicos) y ligando (a base de aminas, solubiliza al catalizador). Gracias a estos componentes se logra un equilibrio rápido que favorece la mayor parte del tiempo la formación de especies temporalmente desactivadas o “durmientes” con el mínimo de especies activas en reacción. (Ramírez et al., 2015)

La reacción inicia con la separación del haluro de su cadena principal por parte del catalizador, dando paso a una zona que puede seguir reaccionando, en este caso uniéndose al monómero presente, los mismos pasos se repiten hasta obtener el polímero deseado (Dávila et al., 2013). Este procedimiento permite un buen control de la síntesis, es poco sensible a impurezas y se obtienen estructuras repetitivas, como contradicción el uso de catalizadores representa problemas ambientales además de que es difícil de remover, la reacción es sensible a la humedad y las temperaturas de polimerización pueden ser altas, dependiendo de las impurezas. (Kelly, 2020)

Polimerización Mediada por Nitróxido (NMP)

La NMP es otra técnica de control de crecimiento de cadenas poliméricas, la reacción reversible comienza con la aplicación de temperaturas altas en el medio provocando el rompimiento homolítico de un enlace C-O a partir de una alcoxiamina,

esto genera un radical polimérico activo y un radical estable de tipo nitróxido; un monómero entra para unificar de nuevo los radicales antes formados, ampliando así la cadena, este proceso es repetitivo hasta obtener la longitud deseada. Los monómeros más utilizados son el estireno y sus derivados por su facilidad de manipulación. (Contreras, 2014)

Polimerización por Transferencia de Cadena Reversible de Adición-Fragmentación (RAFT)

La RAFT es una técnica sencilla de polimerización controlada por adición, se utilizan sustancias llamadas agentes de transferencia de cadena, los cuales en su estructura básica cuentan con una cadena polimérica unida a un tioéster con un elemento que controla la reactividad de la molécula. El proceso inicia con la aplicación de una fuente de radicales, ejemplo temperatura, generando moléculas activas, en el agente de transferencia constantemente se adicionan y liberan cadenas, muchas de las cuales reaccionan con los monómeros presentes, idealmente para prolongarse. (Heuts y Muñoz, 2010)

Métodos de modificación física

Los métodos de modificación física aprovechan propiedades como las fuerzas intermoleculares para formar recubrimientos en superficies sin involucrar reacciones, lo que permite muchas veces que se puedan recuperar dichas estructuras. Dos de estos métodos son: autoensamblaje, donde las moléculas se organizan y acomodan formando capas en la superficie del material por la acción de un tensoactivo y recubrimiento, en el cual se coloca un material que recubre la superficie por adsorción o penetración (Hernández, 2015). Por su inestabilidad son técnicas poco recomendadas y usadas.

La selección de la técnica a seguir para la modificación de superficies depende, entre otras cosas, del sustrato a modificar y el componente a incorporar, del control que se quiera tener sobre la reacción, las características fisicoquímicas que se deseen adquirir, como hidrofobicidad, permeabilidad, comportamiento

antibacteriano, biocompatibilidad, etc., y en general de la aplicación que se dará a la membrana final.

3.2 Formas de unión entre superficie-ion.

Las fuerzas que seleccionaran, atraerán y atraparan los iones presentes en un fluido pueden ser intermoleculares; de naturaleza electrostática o las conocidas fuerzas de Van der Waals. En la primera, la interacción se da por la atracción entre un ion de carga negativa y otro ion o molécula de carga positiva, es decir de polaridad opuesta, manteniendo una unión entre ambos; pudiendo ser entre ion-ion, ion-dipolo e ion-dipolo inducido (López, 2017). Las fuerzas de Van der Waals son atracciones electrostáticas entre moléculas de distinta polaridad, clasificándose en dipolo-dipolo (Keesom), dipolo-dipolo inducido (Debye), dipolo instantáneo-dipolo inducido (London), fuerzas hidrofóbicas y puentes de hidrógeno (Máxima-Uriarte, 2021).

Otra forma en la que se pueden retener los iones de un flujo es a través de la formación de complejos, con la creación de enlaces covalentes de coordinación, donde uno de los átomos comparte un par de electrones para establecer la unión entre ambos (Recio del Bosque, 2012). Dichas interacciones se dan entre un átomo con orbitales libres (receptor) y una molécula con pares de electrones no compartidos (ligandos) (Harris, 2016). Estas reacciones de formación de complejos se clasifican como Teoría ácido-base de Lewis, donde se forman enlaces de coordinación por la capacidad de las especies básicas o ácidas de donar o aceptar electrones (Flowers, 2022). El tipo de interacción dependerá del tipo de moléculas presentes y las condiciones del entorno.

3.3 Caracterización de membranas.

La caracterización de membranas comprende un conjunto de técnicas diversas que ayudan a observar diferentes propiedades estructurales y superficiales de un material, en este contexto de las membranas. Cada caracterización se lleva a cabo en equipos con diferentes técnicas de funcionamiento como, verbigracia, en la Microscopía de fuerza atómica se utiliza la interacción de una punta con la superficie de la muestra para obtener datos e imágenes del relieve de la misma. Otro ejemplo es la técnica de Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier, donde se

utiliza el espectro de infrarrojo para obtener información sobre moléculas y enlaces presentes en un compuesto. Adicionalmente, para obtener mejores y mayores datos se hace mayor uso de técnicas combinadas como la de Infrarrojo de Transformada de Fourier- Reflectancia Total Atenuada.

Es por la necesidad de obtener datos cuantitativos y cualitativos de lo que se está estudiando que es un requisito indispensable utilizar las técnicas de caracterización, con ellas se pueden obtener propiedades fisicoquímicas, estructurales y de composición, además de que algunos equipos también permiten obtener imágenes en 3D. Con esto se sabe si se ha logrado modificar la superficie para el propósito que se le quiera dar o, para nuestro fin, si se han retenido las moléculas deseadas y en qué porcentaje. Algunas técnicas de caracterización se describen a continuación:

MEB (Microscopia Electrónica de Barrido)

El microscopio electrónico de barrido es un equipo con el cual se pueden obtener, entre otros datos, la imagen en 3D y la composición química de sólidos de cualquier naturaleza (orgánicos o inorgánicos) (CCIQS, 2008). En general se compone de una columna con lentes, un sistema de vacío, una cámara de muestras, un cañón de electrones y una computadora como control (Ver fig. 17) (Toshiyuki et al., 2019). El procedimiento que sigue es, a través de una diferencia de potencial se excitan los electrones de los átomos de un filamento (comúnmente de tungsteno) en la parte superior de la columna, debido a ello salen disparados pasando por una secuencia de lentes magnéticos que, junto con unas bobinas de barrido, modifican el haz para focalizarlo y escanear la muestra. (Canal Instituto Torroja TV, 2017)

En este último paso los electrones chocan contra la superficie de la muestra arrancando más electrones, llamados secundarios; se cuantifica la cantidad de estos que son atraídos por el detector de potencial positivo para convertir ese dato en señales eléctricas y, posteriormente en patrones que generaran la imagen de la muestra en escala de grises (o la información que se solicite dependiendo de la radiación y el tipo de detector) (Canal Instituto Torroja TV, 2017). Los únicos

requisitos para utilizar este equipo son: la muestra debe ser o hacerse conductora de electricidad, estar seca y fija.



Figura 17 Microscopio electrónico de barrido. (CCIQS, 2008)

MFA (Microscopía de fuerza atómica)

El microscopio de fuerza atómica (Ver fig. 18), es un dispositivo que se utiliza para estudiar la estructura en 3D, características físicas, químicas y biológicas de la superficie de una muestra a micro y nano escala, esto debido a la punta resaltante de una viga, que interactúa de diversos modos con la parte superior de la membrana (Gerling-Cervantes, 2013). En general estos modos de interacción son: modo de contacto (conductividad eléctrica), modo de contacto intermitente (rugosidad), modo de no contacto (propiedades magnéticas) y modo de modulación de fuerza (propiedades mecánicas). (Grieseler, 2021)

El proceso para obtener alguno de los datos anteriores es: la punta interacciona con la superficie a través de un flujo de electrones, la muestra esta soportada sobre un

escáner piezoeléctrico el cual sigue las ordenes de una computadora y modula los movimientos (altura y direcciones laterales) para explorar la superficie de la muestra, se utiliza un láser el cual rebota en la viga obteniendo así la posición de la punta, el haz rechazado es captado por un detector óptico que convierte el movimiento en señal eléctrica para después ser procesada y obtener el dato que se desea (Urbano-Ramírez, 2018). No hay requerimientos especiales de preparación de la muestra, estas pueden ser sólidas o líquidas de naturaleza biológica, orgánica o inorgánica. La punta se elige de acuerdo a la muestra a analizar y el dato que se desea obtener. (Grieseler, 2021)

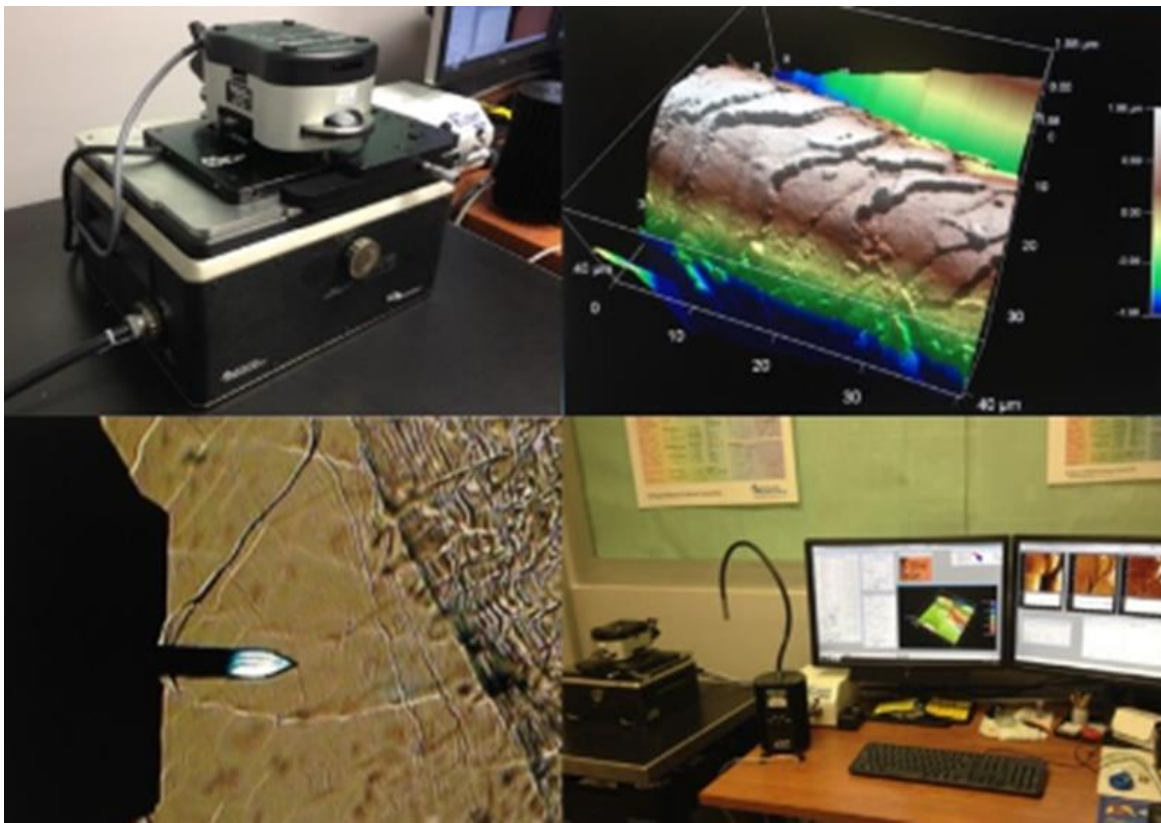


Figura 18 Microscopio de fuerza atómica. (CCIQS, 2008)

MET (Microscopía electrónica de transmisión)

El microscopio electrónico de transmisión (Ver fig. 19), cuenta prácticamente con el mismo principio teórico que el microscopio electrónico de barrido, la diferencia radica en la posición de la muestra y la forma de obtener la imagen. En dicha técnica se genera una diferencia de potencial para excitar electrones a partir de un filamento o cañón y hacerlos saltar hacia una lente condensadora, esta los focaliza en un haz

para que atraviesen la muestra, dependiendo de la densidad de la muestra algunos electrones pasaran y otros serán retenidos (UPV, 2020), los que pasan se dirigirán hacia un lente objetivo el cual proyecta la imagen que será ampliada por una última lente electromagnética, la imagen podrá ser observada ya que los electrones resultantes se hacen incidir sobre una pantalla fluorescente. (Educació Sanitària, 2018)

Este método permite conocer la estructura interna, información morfológica y cristalográfica del modelo, con la desventaja de perder una buena cantidad de información al requerir una muestra muy delgada y pequeña, de escala nanométrica, para poder obtener una imagen más clara (CCIQS, 2008). Por otra parte, con la transmisión de rayos X característicos se puede conocer la constitución química de la muestra. Todo el proceso se lleva a cabo en vacío y puede ser utilizado para gran cantidad de materiales con una preparación apropiada.



Figura 19 Microscopio Electrónico de Transmisión. (CCIQS, 2008)

XPS (Espectroscopia foto electrónica de rayos X)

El equipo XPS (Ver fig. 20), se compone de una fuente de rayos x, al seleccionar dicha longitud con un cristal de cuarzo, una cámara de alto vacío, porta muestras, lente de captura de electrones, filtro, detector, procesador de señal y sistema óptico de visualización. (Universidad de Granada, s. f.) La técnica inicia incidiendo un haz de rayos x sobre el ejemplar en una cámara de vacío, provocando la excitación de los electrones de la superficie, cuando la energía de ionización es alta, los ahora fotoelectrones saldrán expulsados y serán recolectados por una lente, dichos datos se transforman en señal y finalmente en la información visual. (FA3 Nuevos Materiales Divulgatia, 2015)

Dependiendo de la variación del espectro y del ángulo de salida de los electrones se pueden obtener diferentes datos cualitativos, referentes a la caracterización química y eléctrica de la muestra (Universidad de Málaga, s. f.) Esta información es recopilada a través de gráficas, como ejemplo el espectro de energía vs intensidad. Los únicos requisitos que debe cumplir la muestra son que esta debe estar seca y ser de ancho delgado. (Atom Education, 2021)



Figura 20 Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (CCIQS, 2008)

DRX (Difracción de Rayos X de polvos)

Con el equipo DRX (Ver fig. 21), se obtiene información a partir de la estructura, aristas y ángulos, de redes cristalinas de metales, aleaciones, polímeros, algunos cerámicos, etc.; para conocer sus constituyentes químicos, fases y transformación química (Universidad de Burgos, 2021). El análisis de muestras inicia en un tubo como fuente de rayos x, el haz pasa por una rejilla donde se controla para que incida sobre la muestra colocada sobre un portaobjetos giratorio, los polvos de cristal reflejarán los rayos x que pasarán por otra rejilla de control y finalmente por un detector electrónico en movimiento. (Bautista, 2020)

Esta técnica es muy útil ya que posibilita reconocer los componentes de la muestra, aun sin saber cuáles son, al comparar los patrones de las gráficas con otras existentes en bases de datos. Como su nombre lo indica, el método requiere que la muestra sea molida para su análisis. Las gráficas que se obtienen contienen los patrones del espectro de filtración de cada elemento, correspondientes al ángulo de difracción (abscisas) y a la intensidad (ordenadas). (Bautista, 2020)



Figura 21 Difracción de rayos X de polvos. (CCIQS, 2008)

ATR (Reflectancia Total Atenuada)

La técnica ATR se utiliza generalmente como complemento de otros métodos de análisis por ser una técnica simple y fácil de acoplar. Consta de tres partes principales, fuente generadora de radiación infrarroja, material óptico de transmisión donde habitualmente se usa un diamante, y un detector de radiación refractada (Téllez, 2019). No se requiere ninguna preparación especial de la muestra, se puede utilizar para todo tipo de ejemplares, orgánicos e inorgánicos, en fase líquida, sólida o gas (Serrano, 2007).

El procedimiento empieza cuando el haz infrarrojo penetra en el cristal, al chocar con la muestra se crean pequeñas ondas incitadas por las inflexiones del haz, permitiendo obtener información estructural y de composición en base a los datos del infrarrojo resultante (CCIQS, 2008). Esta información se obtiene visualmente a través de graficas que contienen los espectros resultantes característicos de cada elemento de la mezcla. (M. T. AutoChem, 2020)

FTIR (Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier)

La FTIR es una técnica que utiliza la zona del espectro infrarrojo para obtener información sobre moléculas y enlaces presentes en una muestra, ya sea sólida o líquida, orgánica o inorgánica. Se basa en el principio de que gran cantidad de grupos funcionales solo absorben longitudes de onda características; las gráficas que se obtienen representan la absorbancia o transmitancia de la molécula contra la longitud de onda donde se presenta un cambio (Mondragón, 2017). Es una prueba rápida y la única condición que presenta es que la muestra no contenga humedad o en su defecto hay que adaptarla al sistema.

El equipo cuenta con tres partes fundamentales, el primero una fuente donde se genera la luz de infrarrojo en un intervalo definido, el segundo un interferómetro de Michelson en el que se irradia la muestra con las ondas provocando una absorbancia selectiva en forma de vibración (de tensión y flexión) de la molécula y de transmitancia por la luz rechazada (Gómez y Murillo, 2006). Finalmente se

encuentra la última sección liderada por un detector en la cual se recoge la señal obtenida (intensidad y frecuencia), y a través de algoritmos matemáticos se transforma en gráficas de espectros de IR. (Zambrano, 2020)

FTIR-ATR (Infrarrojo de Transformada de Fourier- Reflectancia Total Atenuada)

El equipo FTIR-ATR (Ver fig. 22), es una combinación o complemento de las mismas por separado. La técnica ATR es muy utilizada como complemento de la Espectroscopía Infrarroja de Transformada de Fourier, ya que permite simplificar el método de análisis, además de acaparar más y mejores resultados, con el gran beneficio de no requerir preparaciones especiales de la muestra. Todo esto es gracias al aprovechamiento de las mejores cualidades de ambas técnicas.

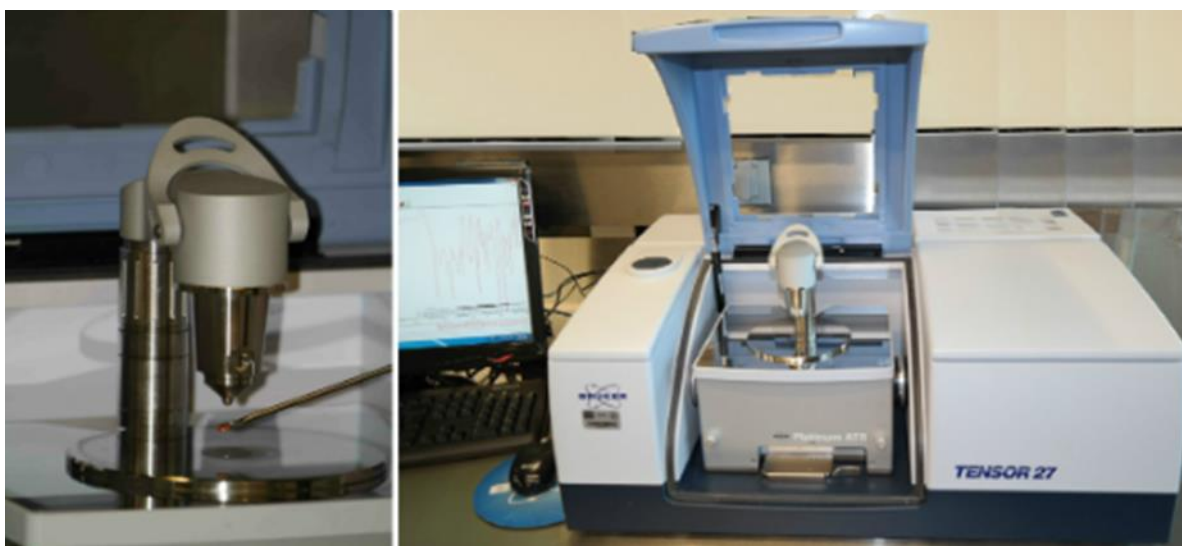


Figura 22 Espectroscopía de Infrarrojo/ATR. (CCIQS, 2008)

MEB-EDS (Microscopia Electrónica de Barrido -Espectrometría de Rayos X de Energía Dispersiva)

La Espectrometría de Rayos X de Energía Dispersiva se usa exclusivamente para conocer los elementos que componen la materia en estudio, por lo que se acopla a

otras técnicas como la microscopia electrónica de barrido para aprovechar la energía y complementar la información obtenida. (Rosales, 2016)

3.4 Métodos de degradación de polímeros.

La degradación de polímeros consiste en romper los enlaces de la macromolécula para desintegrar el polímero. En el caso de los polímeros sintéticos para poder reutilizarlos o, en su defecto, que su desecho sea menos contaminante. El tratamiento para el caso de los polímeros naturales es más fácil ya que su incorporación al ambiente se lleva a cabo de manera natural.

El gran problema de los polímeros sintéticos son sus propiedades que perduran con el paso del tiempo, dotadas por su composición, estructura y por proceder de recursos no renovables y altamente contaminantes. Algunas de estas propiedades como su alta resistencia a factores ambientales, capacidad aislante, elasticidad, insolubilidad e inercia química, por mencionar algunos, los hacen difíciles de desechar por medios poco contaminantes (Hermida, 2011). En general las formas de degradación de polímeros son las siguientes.

Degradación biológica (biodegradación)

Cualquier polímero puede ser deteriorado por acción del medio ambiente, la diferencia radica en el tiempo que tarda en hacerlo y los residuos que se generan, por esto es que no se considera a la gran mayoría de los polímeros sintéticos como biodegradables. Entre los polímeros biodegradables se encuentran todos los de origen natural y algunos sintéticos como los poliortoésteres, polianhídridos, poliuretanos, policarbonatos, entre otros (López-Tolentino, 2012). Estos se pueden degradar por la acción enzimática de microorganismos del ambiente en tiempos relativamente cortos y generando residuos poco o nada contaminantes.

Las enzimas presentes en el área metabólica de microorganismos como hongos, bacterias y algas son las encargadas de transformar cadenas de polímeros en sustancias amigables con el medio ambiente tales como agua, oxígeno, biogás, y biomasa (Rodríguez et al, 2021). La clase de polímero que se pueda degradar y los

desechos a generar dependen del tipo de organismo y enzimas que este contenga, además de variables del ambiente donde crece como el pH, humedad, oxígeno, nutrientes y temperatura (Flores, 2009). En general el tiempo de degradación de polímeros puede llevar de uno a seis meses.

Existen dos tipos conocidos de enzimas que se encargan de degradar polímeros, las primeras son las enzimas oxidorreductasas que, como su nombre lo indica, a través de una reacción de óxido-reducción de transferencia de electrones, transforman grupos funcionales (Posada-Bustamante, 2006). El otro tipo de enzimas son las llamadas hidrolasas, estas se basan en la fractura de enlaces de grupos funcionales al hacerlas reaccionar con agua (Monje y Ferrero, 2021). Las propiedades físico-químicas del polímero determinan que mecanismo implementar. La degradación consiste en la adición de la cadena al sitio activo de la enzima formando un complejo y rompiendo los enlaces (Labeaga, 2018).

Degradación térmica.

Conocida como pirólisis en ausencia de oxígeno o como termo-oxidación en presencia de este, consiste en la aplicación de calor al material polimérico incitando la vibración y separación de sus enlaces (San Andrés et al, 2010). Siendo enlaces covalentes, al aumentar el calor disminuyen su resistencia hasta separarse y reorganizar su estructura, formando especies más pequeñas como monómeros, agua, radicales libres, vapores, entre otros (Rojas et al, 2014), dependiendo de la naturaleza del polímero. La temperatura para que esto suceda depende de las temperaturas de transición vítrea y de fusión del polímero, donde a partir del primero se da una alta pérdida de rigidez de la cadena (Miranda, 2015). La mayoría de polímeros se degrada a temperaturas menores de los 500°C.

Con la aplicación de temperatura se afectan propiedades no solo químicas del polímero, sino también físicas, mecánicas y eléctricas (Arenas, 2014). El crackeo térmico se inicia con la separación de los enlaces C-C en ausencia de oxígeno, hasta consumir toda la cadena (Posada-Bustamante, 2006). La inestabilidad del proceso puede generar reacciones indeseables en cadena, propiciando la

formación de otros compuestos; además, es una técnica poco recomendada por los residuos que genera, ya que muchos de ellos son altamente contaminantes para el medio ambiente.

Degradación química.

Esta ocurre por la presencia de reactivos químicos, como ácidos, bases, solventes, gases, etc., que disminuyen la estructura monomérica del polímero (Miranda, 2015). Dos de los tipos de degradación química más utilizados son la hidrólisis y las reacciones de óxido-reducción. El primero es con el uso de solventes los cuales causan la hinchazón del polímero, su tensión y posterior descomposición (González, 2012). El segundo por el ataque de agentes oxidantes que, subsecuentemente, causan la degeneración del polímero por la formación de otro tipo de compuestos (Guzmán, 2006). La mayoría de polímeros son resistentes al ataque de diferentes químicos, por lo que dependiendo de su estructura se elige el medio a utilizar.

Degradación mecánica.

La degradación mecánica comprende el uso de fuerzas que transforman físicamente la estructura del polímero. Estas modificaciones físicas conllevan la fractura del material por cortes, limado, cizalla, taladrado, torneado, etc., y por lo tanto la ruptura de enlaces del polímero (Carranza et al, 2010). Dos de las técnicas más comunes de degradación mecánica son por ultrasonido y temperaturas criogénicas. Aplicando temperaturas extremadamente bajas a un material se cambian sus propiedades físicas lo que aumenta la facilidad de ruptura en los enlaces de la cadena de polímeros. (Posada-Bustamante, 2006)

El ultrasonido es una técnica física de corte muy preciso de materiales donde a través de un medio se aplican ondas sonoras que expanden y comprimen el medio (Ríos et al, 2016). Debido a las ondas de choque generadas se forman burbujas que crecen con la aplicación de la fuerza hasta llegar a un punto en que revientan,

acelerando el líquido alrededor y creando un entorno de altas temperaturas y presiones, este efecto provoca el corte de puntos específicos en la cadena polimérica (Blanco-Cárdenas, 2010). Esta es una técnica limpia y que no afecta las propiedades químicas del material a tratar.

Degradación por radiación.

La aplicación de radiación de diversas longitudes de onda, como los rayos X, rayos gama, infrarrojo y ultravioleta, promueven la degradación de polímeros. En general por la absorción de energía, los enlaces de la cadena polimérica se rompen y forman nuevas y más pequeñas sustancias químicas, desintegrando la cadena original (García-Pérez, 2005). La fotodegradación con radiación solar es una de las técnicas más utilizadas ya que es la que más alteraciones físico-químicas produce en los polímeros, esta se observa con la decoloración, envejecimiento y posterior rompimiento del material. (Miranda, 2015)

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

Los resultados preliminares, de la evaluación de la eficiencia de la membrana de polipropileno funcionalizada con quitosano en la remoción de los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} , causantes de la dureza del agua, se llevaron a cabo en dos etapas. En la primera se inicia con la obtención de las membranas funcionalizadas y en la segunda con la remoción de dichos iones sobre una solución sintética y otra superficial. Estas fases se describen a continuación.

4.1 Funcionalización de membranas de polipropileno modificadas.

La estructura del polipropileno lo hace un material bastante resistente e ideal como soporte de membrana, sin embargo su hidrofobicidad y buena estabilidad no le permite retener iones, entre ellos al Ca^{+2} y Mg^{+2} . Por lo tanto, se funcionaliza con quitosano el cual contiene grupos polares amino e hidroxilo, injertando dichos grupos por medio de una reacción de polimerización por injerto, utilizando radiación ultravioleta. El quitosano dotará a la superficie con los grupos polares, que tendrán la capacidad de retener estos iones (Ca^{+2} , Mg^{+2}) no deseados, causantes de la dureza del agua; aunado a ello, la membrana al modificarse se convierte en un material capaz de degradarse con mayor facilidad.

Para la preparación de la membrana se cortaron varios cuadrantes de 4x4 cm de membranas de polipropileno 3M isotáctico y se pesaron en la balanza analítica identificándolas con peso, número y fecha (Ver fig. 23).

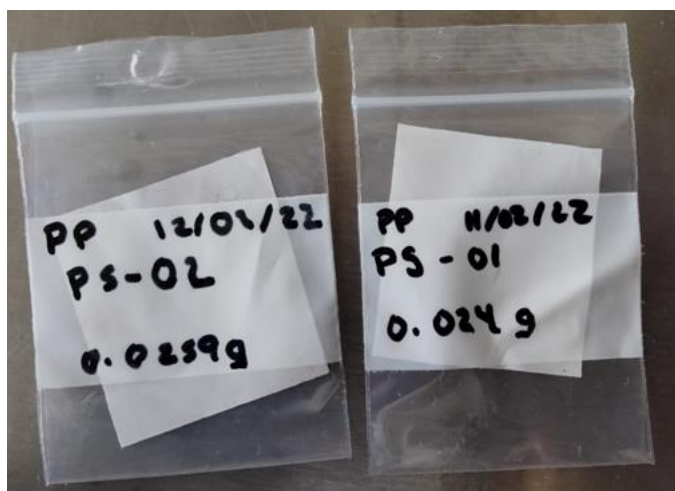


Figura 23 Identificación de membranas.

Se prepararon soluciones de ácido acrílico-quitosano, marca Aldrich, agitando constantemente a una temperatura de 40°C y presión atmosférica (Ver fig. 24).

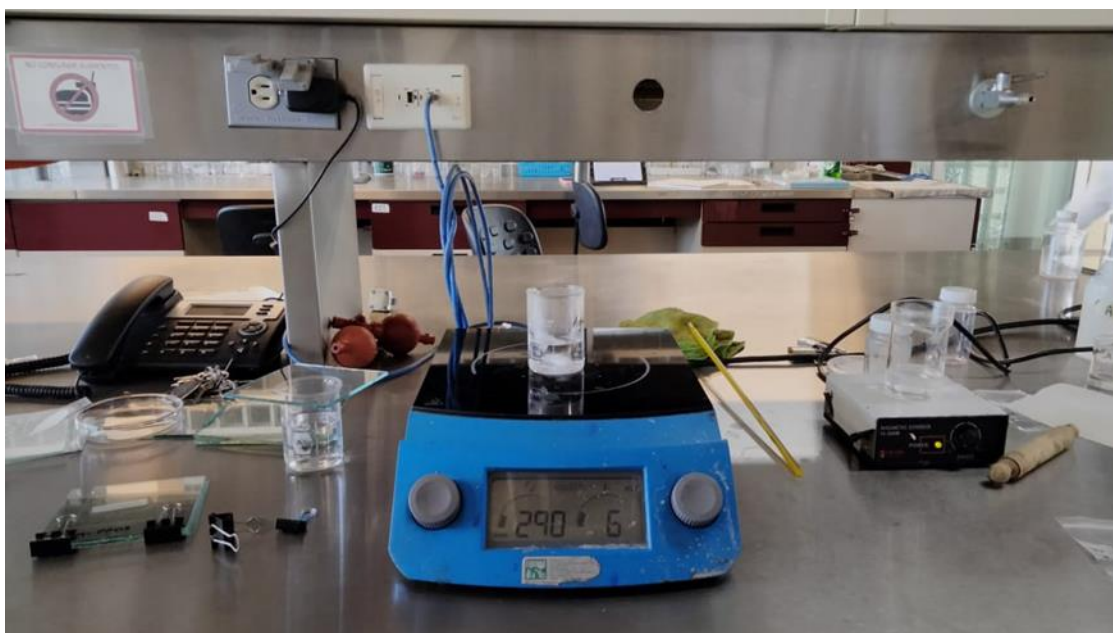


Figura 24 Modificación de la membrana de polipropileno con soluciones de quitosano.

Posteriormente, las membranas se colocaron en dos placas de vidrio y se sellaron con clips (Ver fig. 25), para introducirlos en el fotoreactor marca Luzchem (Ver fig. 26). Después se enjuagaron con etanol por media hora y se secaron a vacío hasta alcanzar el peso constante.

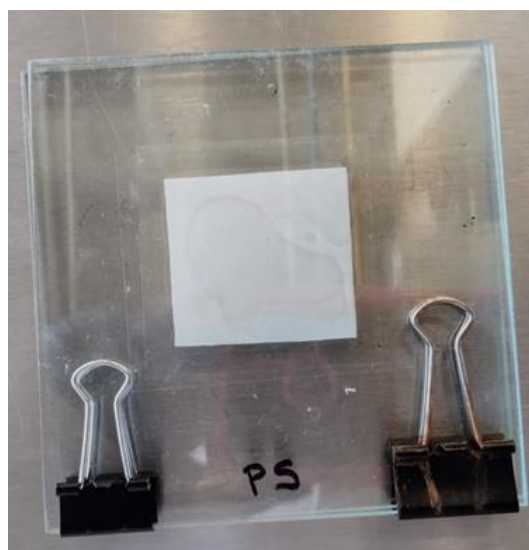


Figura 25 Introducción de la membrana al fotoreactor.



Figura 26 Fotoreactor marca Luzchem

4.2 Tratamiento de la dureza del agua utilizando membranas de polipropileno funcionalizadas.

Una vez obtenidas las membranas se llevó a cabo el proceso de filtración de agua sintética y superficial utilizando una bomba peristáltica (Masterflex) con soporte para filtros y manejando un flujo constante de 30 mL/min.

El proceso de filtración se continuó con la caracterización de las membranas modificadas. Se realizó la medición de los iones Ca^{+2} y Mg^{+2} con ayuda de la técnica combinada TF-IR-ATR (Infrarrojo de Transformada de Fourier- Reflectancia Total Atenuada), obteniendo el espectro correspondiente (Ver fig. 27).

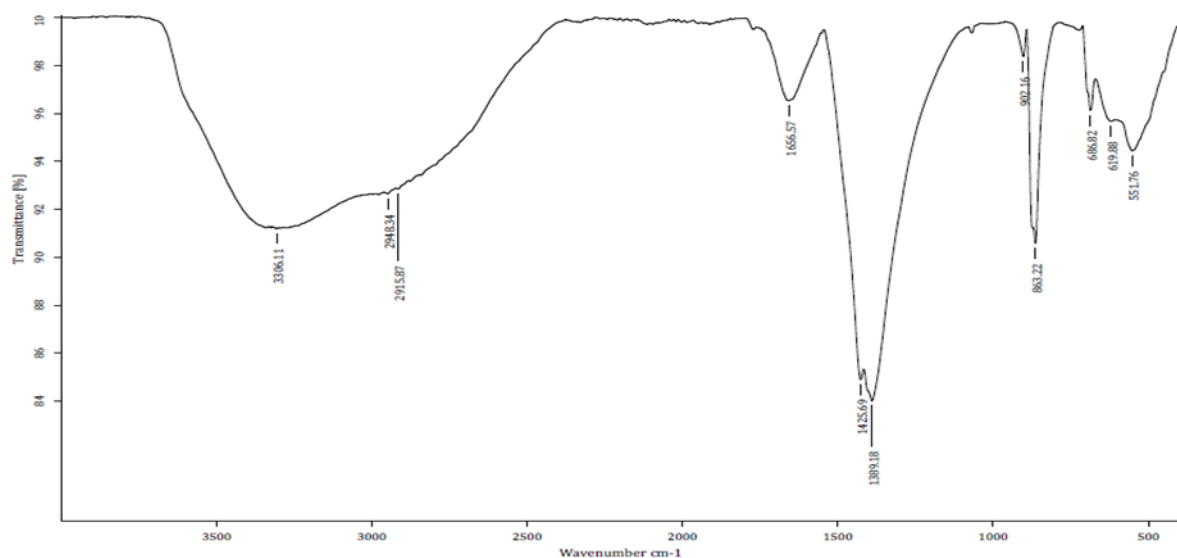


Figura 27 Espectro TF-IR-ATR

El espectro FT-IR-ATR mostró la presencia de los grupos funcionales en la membrana modificada observando las vibraciones características del polipropileno a una longitud de onda de 2919, 1456 y 1258 cm^{-1} . La modificación con quitosano se observa con las bandas en 3306 y 1656 cm^{-1} , que corresponden a los grupos amino en el quitosano.

Evaluación de la remoción de iones metálicos (Ca^{+2} y Mg^{+2}) con membrana modificada.

La membrana modificada se utilizó como filtro de soluciones con contenido de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} . Se analizó la eficiencia de la membrana filtrando varias veces con la misma membrana, encontrando que la remoción se incrementa a medida que aumentan el número de filtraciones, como se observa en la tabla 4 y su correspondiente gráfica.

Tabla 4 Remoción de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} y número de filtraciones.

Filtración	Porcentaje de Remoción Ca^{+2}	Porcentaje de Remoción Mg^{+2}
0	0	0
1	41.176	10.521
2	47.059	39.363
3	47.051	40.400
4	70.588	82.363

CAPITULO 5. CONCLUSIONES

Se encontró que las membranas de polipropileno funcionalizadas con quitosano son eficaces en la remoción de iones Ca^{+2} y Mg^{+2} , causantes de la dureza del agua, incrementando su porcentaje de remoción en la medida que se aumenta el número de filtraciones con la misma membrana.

La modificación de la membrana de polipropileno con quitosano permitió obtener una membrana con mejores propiedades de selectividad y permeabilidad, con la introducción de grupos polares amino e hidroxilo, aunado a que puede ser reutilizada y es de fácil degradación.

La técnica empleada, fotoinjerto con radiación UV, para la funcionalización de la membrana, es un proceso sencillo, económico y amigable con el medio ambiente, lo que lo hace idóneo para ser empleado en la modificación de membranas.

Mediante la técnica FTIR-ATR se pudo observar el proceso de funcionalización de la membrana de polipropileno con quitosano, obteniendo buenos resultados de modificación de la membrana.

BIBLIOGRAFÍA

ACD/Labs (s. f.) Free Chemical Drawing Software for Students | ChemSketch | [en línea], disponible en: <https://www.acdlabs.com/resources/free-chemistry-software-apps/chemsketch-freeware/>

Adamczak, M., Kamińska, A. y Bohdziewicz, J. (2019) Preparation of Polymer Membranes by In Situ Interfacial Polymerization. International Journal of Polymer Science, vol 2019, artículo ID 6217924, pp. 13. Disponible en: <https://doi.org/10.1155/2019/6217924>. (Consultado 08-09-2022)

Agua Servicio Hurtado. (2019) Los efectos negativos del agua dura. Disponible en: <https://www.aguaserviciohurtado.com.mx/blog/articles/los-efectos-negativos-del-agua-dura> (Consultado 13-10-2022)

Águila, E., Salgado, R., Vargas, Z., García, E. y Hernández, H. (2019) Enzymatic Depolymerization of Chitosan for the Preparation of Functional Membranes. Hindawi Journal of Chemistry, vol. 2019, artículo ID 5416297, pp. 8.

Alsuhybani, M., Alshahrani, A. y Haidyrah, A. (2020) Synthesis, Characterization, and Evaluation of Evaporated Casting MWCNT/Chitosan Composite Membranes for Water Desalination. Journal of Chemistry, Hindawi, vol. 2020, Artículo ID 5207680, 9 páginas.

Amaya, E., Molina, F. y Sánchez, M. (2018) Producción de Polipropileno. Proyecto final de Licenciatura. Universidad Nacional de Cuyo.

Anastas, P., y Eghbali, N. (2010) Green Chemistry: Principles and Practice. Chem. Soc., Rev. 39, pp. 301-312.

Aquae Fundación. (2021) Ósmosis inversa: ¿qué es y por qué es importante? Disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/wiki/que-es-osmosis-inversa/> (Consultado 10-08-2022)

AquaHomeGroup. (2021) Formas de ablandar el agua dura en casa (en línea) disponible en: <https://aquahomegroup.com/blogs/news/formas-de-ablandar-el-agua-dura-en->

casas#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20m%C3%A9s%20barato%20y,un%20precipitado%20insoluble%20y%20gas. (Consulta 05-09-2022)

Araújo, A. y Rodríguez, M. (2012) Síntesis de una membrana zeolítica de tipo Y soportada en α -Alúmina: Efecto del tratamiento térmico sobre la estructura. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 3(3), pp. 51-58.

Arenas, Y. (2014). Influencia de la temperatura sobre la degradación de películas plásticas. Tesis de Licenciatura. Azcapotzalco. Universidad Autónoma Metropolitana.

Ariadi, R., Andre, N., Sangkota, V., Basid, N., Siahaan, P., Abadi, A. y Hafiz, M. (2020) In-Vitro Study of Polysulfone-polyethylene glycol/chitosan (PEG-PSf/CS) Membranes for Urea and Creatinine Permeation. Journal of Scientific and Applied Chemistry, vol. 23(8) (2020): pp. 283-289.

Arriagada, R., García, R. y Cid, R. (2001) Retención de cromo y mercurio con zeolitas naturales y sintéticas. Disponible en: <https://www.zeocat.es/docs/aquacrhg.pdf> (Consultado 11-09-2022)

Asociación Española de Desalación y Reutilización (2019) ¿Qué es y en qué consiste la Ósmosis Inversa? Disponible en: <https://aedyr.com/que-es-osmosis-inversa/> (Consultado 03-08-2022)

Atias, K. (2018) Filtración de Agua - Paso a Paso. Disponible en: <https://es.amiad.com/blog/step-by-step-water-filtration/>. (Consultado 18-09-2011)

Atom Education. (2021) Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (Video online) Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=QUEZ3qlrd-c>. (Consulta 10-10-2022)

Ayala, M., Peñuela, G. y Montoya, J. (2006) Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (38). pp. 53-63.

Baena-Paz, G. (2017) Introducción a la Metodología de la Investigación. En: Metodología de la Investigación. Ed. por Callejas, J. Cd. De México. Grupo Editorial Patria, pp. 18-20. Tercera Edición.

Barrera, D., Márquez, M., Yegres, J. y Navas, P. (2013) Producción de plástico parcialmente degradable con polietileno de alta densidad (PEAD) y la dextrina del desecho de *Solanum tuberosum*. Química Viva, vol. 12 (1), pp. 27-38.

Bauer, J., Faustino, L. y Zucchetti, A. (2022) Applications of chitosan in agriculture, industry and health. South Florida Journal of Environmental and Animal Science, Miami, vol.2 (2), pp. 37-45. ISSN 2769-3252.

Baute-García, C. (2017) Comparación del comportamiento de membranas de OI y NF para la mejora de la calidad del agua de abasto municipal. Tesis de licenciatura. España. Repositorio institucional de la Universidad de La Laguna.

Bautista, F. (2020) Difracción de rayos X en polvos. (Video online) Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=o9OfUJQ-de8>. (Consulta 26-08-2022)

Bautista, G. (2019) Estandarización de los métodos analíticos alcalinidad y dureza en una muestra de agua recreativa de la Universidad Manuela Beltrán sede Bogotá. Tesis de Licenciatura. Bogotá, Colombia: Repositorio Corporación Tecnológica de Bogotá.

Bautista, S., Hernández, A., Velázquez, M., Bosquez, E. y Sánchez, D. (2005) Quitosano: Una alternativa natural para reducir microorganismos postcosecha y mantener la vida de anaquel de productos hortofrutícolas. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, vol. 7 (1)., pp. 1-6.

Beccalee (2016) Imagen de Cueva, Estalagmita y Estalactita. De uso gratuito. (en línea) Pixabay. Disponible en: <https://pixabay.com/es/photos/cueva-estalagmita-estalactita-1890628/> (Consulta 22-09-2022)

Benavides-Prada, O. y Muvdi-Nova, C. (2014) Evaluación de la ósmosis inversa y de la evaporación de película ascendente como técnicas de concentración de hidrolizados de almidón de yuca. Revista ION, vol. 27 (1)., pp. 59-70.

Benito, J., Conesa, A. y Rodríguez, M. (2011) Membranas cerámicas. Tipos, métodos de obtención y caracterización. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, vol. 43 [5]. pp. 829-842.

BioRender (s. f.) BioRender [en línea]. Disponible en: <https://biorender.com/>

Blanco-Cárdenas, A. (2010) Estudio de la dispersión y exfoliación de nanopartículas inorgánicas y modificación de polietileno con ácido itacónico aplicando ultrasonido durante la extrusión reactiva. Tesis de Maestría. Saltillo, Coahuila. Centro de Investigación en Química Aplicada.

Bolívar, G. (2020) Electrodialisis: cómo funciona, ventajas, desventajas, usos. En: Lifeder. (En línea) Disponible en: <https://www.lifeder.com/electrodialisis/>. (Consulta 05-08-2022)

Bolívar, G. (2020) Fuerzas intermoleculares. En: Lifeder. (En línea). Disponible en: <https://www.lifeder.com/fuerzas-intermoleculares/>. (Consulta 12-09-2022)

Brand Industry. (2019) Resinas de intercambio iónico, su función química en el tratamiento del agua. En: Contyquim. (En línea). Disponible en: [https://contyquim.com/blog/resinas-de-intercambio-ionico-su-funcion-quimica-en-el-tratamiento-del-agua#:~:text=Principales%20tipos%20de%20resinas%20i%C3%B3nicas&text=Cat%C3%B3nica%20fuerte%20\(CF\),Ani%C3%B3nica%20d%C3%A9bil%20\(AD\)](https://contyquim.com/blog/resinas-de-intercambio-ionico-su-funcion-quimica-en-el-tratamiento-del-agua#:~:text=Principales%20tipos%20de%20resinas%20i%C3%B3nicas&text=Cat%C3%B3nica%20fuerte%20(CF),Ani%C3%B3nica%20d%C3%A9bil%20(AD).). (Consulta 09-09-2022)

Bugeño, R. (s/f) Desventajas de la planta de osmosis inversa. En ACADEMIA. (En línea) Disponible en: https://www.academia.edu/25118039/Desventajas_de_la_planta_de_osmosis_inversa. (Consulta 21-08-2022)

Caicedo, C., Crespo, L., De La Cruz, H. y Álvarez, N. (2017) Propiedades termomecánicas del Polipropileno: Efectos durante la reprocesamiento. Ingeniería, Investigación y Tecnología, XVIII (3), pp. 245-252. ISSN: 1405-7743.

Calderón, C., Quezada, M., Segura, N. y Hernández, C. (2012) Remoción de arsénico mediante procesos de membrana. Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. III., pp. 37-51.

Canal Instituto Torroja TV. (2017) El microscopio electrónico de barrido (Video online) Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=7NQzr4Nn5VU>. (Consulta 26-10-2022)

Cardona, C., Molina, D., González, R. y Arbeláez, O. (2021) Introducción a la tecnología de membranas para la purificación de biogás y algunos desarrollos recientes. Revista Politécnica, vol. 17 (33). pp. 76-89.

Caro-León, F., López-Martínez, L., Lizardi-Mendoza, J., Argüelles-Monal, W., Goycoolea-Valencia, F., Carvajal-Millán, E. y López-Franco, Y. (2019) Métodos de preparación de nanopartículas de quitosano: una revisión. Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud (Biotecnia), vol. XXI (3), pp. 13-25.

Carranza, R., Duffo, G. y Fariña, S. (2010) Nada es para siempre, química de la degradación de los materiales. Buenos Aires, Argentina. Artes Gráficas Rioplatense S. A.

CCIQS. (2008) Laboratorios. En: Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable UAEM-UNAM (En línea) Disponible en: <http://www.cciqs.unam.mx/> (Consulta 21-10-2022)

Chacón-Villalobos, A. (2006) Tecnologías de membranas en la agroindustria láctea. Agronomía Mesoamericana, vol. 17 (2). 243-263.

Chang, R. y College, W. (2002) La química de los metales de transición y los compuestos de coordinación. En Química. Ed. por Hernández, F. México, D. F.: McGraw Hill, pp. 877-885.

Cimbru, A., Kadhim, A., Oprea, O., Raluca, A., Szidonia, T., Simonescu, M., Pascu, D., Vlad, G., Dumitru, F. y Nechifor, G. (2022) pH and pCl Operational Parameters in Some Metallic Ions Separation with Composite Chitosan/Sulfonated Polyether

Ether Ketone/Polypropylene Hollow Fibers Membranes. *Membranes*, vol. 12(9), pp. 833.

CONAGUA. (2019) Estadísticas del Agua en México 2019. En: Sistema Nacional Ambiental SINA. (En línea) Disponible en: https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf. (Consulta 25-10-2022)

CONAGUA. (2021) Calidad del agua en México. En: Gobierno de México. (En línea) Disponible en: <https://www.gob.mx/conagua/articulos/calidad-del-agua>. (Consulta 25-10-2022)

Contreras, C. (2015) Funcionalización, micro/nanoestructuración de superficies esféricas y planas: preparación de materiales híbridos. Tesis doctoral. España. Repositorio Digital Universidad Nacional de Córdoba. Disponible en: <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/14314>. (Consulta 23-09-2022)

Contreras, D. (2014) Modificación y Síntesis de Polímeros de Isopreno vía Polimerización Radicálica Controlada. Tesis doctoral. Saltillo, Coahuila. Centro de Investigación en Química Aplicada. Disponible en: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/7/1/Tesis%20DTP%20David%20Contreras%20Lopez%20Sep%2012%202014.pdf>. (Consultado 11-08-2022)

Córdoba, B., Jesús, E., Díaz, A. y Norelis, A. (2012) Influencia de la dureza del agua en los procesos de acabado de la industria textil. Tesis de licenciatura. Caracas Venezuela. Repositorio Institucional de la Universidad Central de Venezuela. Disponible en: <http://190.169.30.62/handle/10872/1416>. (Consultado 14-08-2022)

Corso, P., López, A., Caleffi, C., Donminguez, N. y Días G. (2016) Polipropileno. Universidad José Antonio Páez. Disponible en: <https://ppqujap.files.wordpress.com/2016/05/proceso-de-polipropileno.pdf>. (Consultado 22-09-2022)

Dávila, A., Sáenz, A. y Pérez, C. (2013) Nanocompuestos obtenidos mediante la polimerización radical controlada por transferencia de átomo (ATRP). *Revista Iberoamericana de Polímeros*, vol. 14(3), pp 117–126.

Deratani, A., Plameri, J., Moliner, S. y Sánchez, E. (2011) Uso de la tecnología de nanofiltración a través de membranas para el tratamiento de las aguas residuales de la industria cerámica. QUALicer, 12a Ed.

Douglas, B., McDaniel, D. y Alexander, J. (1994) Reaction mechanisms of coordination compounds. En: Concepts and Models of Inorganic Chemistry. Ed. por: Rose, N. New York. 3rd Ed: John Wiley and Sons., pp 342.

EboomYa. (2022) Equipo de Electrodialisis. (en línea). Disponible en: https://es.eboomya.com/electrodialysis-equipment_p251.html#pro_inquiry. (Consulta 25-08-2022).

Educació Sanitària (2018) Microscopio electrónico de transmisión (Video online). Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=PNzTUR_71ik. (Consulta 25-08-2022)

Equipos Ósmosis Inversa (2022) ¿Cuánto cuesta un sistema de ósmosis inversa? Comparativa de precios (en línea) disponible en: <https://equipososmosisinversa.com/cuanto-cuesta-un-sistema-de-osmosis-inversa/> (Consulta: 12-09-2022)

Equipos Ósmosis Inversa (2022) ¿Qué Es Un Sistema De Intercambio Iónico y Cómo Funciona? (en línea) disponible en: <https://equipososmosisinversa.com/sistema-de-intercambio-ionico/> (Consulta 15-09-2022)

Escobar-Jiménez, J., Muro, C., Esparza, M., Gómez, R., Díaz, C., García, B., Ortega, R. y Zavala, R. (2012). Recuperación de agua de efluentes de una industria de cereales utilizando membranas. Tecnología y Ciencias del Agua, vol. III (3), pp. 65-82.

Eun Park, J., Shin, J., Oh, W., Choi, S., Kim, J., Kim, C. y Jeon, J. (2022). Removal of Hexavalent Chromium (VI) from Wastewater Using Chitosan-Coated Iron Oxide Nanocomposite Membranes. Toxics, vol. 10(2), pp. 98.

Facsa (2016) La dureza del agua. Disponible en: <https://www.facsa.com/municipios/wp-content/uploads/2016/02/Facsa-dureza-del-agua-Alcora.pdf> (Consulta 01-09-2022)

FA3. Nuevos Materiales, DIVULGATIA. (2015) Espectroscopía de rayos X. (Video online) Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Pwkli8UYArI>. (Consulta 11-09-2022)

Ferreira, D. (2011) Telas de polipropileno revestidas por quitosana/polietilenoglicol na ocorrência de aderências peritoneais: estudo experimental em ratas. Tesis de posgrado. Goiás, Brasil. Repositorio Institucional Universidad Federal de Goiás. Disponible en: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/bitstream/tde/856/1/Dissert-Danilo%20Ferreira%20Rodrigues.pdf>. (Consulta 03-10-2022)

Flores, D. (2009) Elaboración de materiales biodegradables base sacarosa. Tesis de especialización. Saltillo, Coahuila. Repositorio Institucional CIQA. Disponible en: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/370/1/Daniela%20Sara%20Flores%20Valdez.pdf>. (Consulta 07-10-2022)

Flowers, P., Theopold, K., Langley, R. y R. Robinson, W. (2022). Química. 2ed. Houston, Texas: OpenStax.

Functional Surfaces B3 (2013) Plasma Functionalisation and Etching (Video online). Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=nNzNNJeCOPk&t=614s> (Consulta: 02-09-2022)

Functional Surfaces B4. (2013) Plasma Polymerisation (Video online). Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=39YHjHwIw-k> (Consulta: 02-09-2022)

Fundación Aquae. (2017) ¿Cuántos tipos de agua existen según su dureza? (en línea) disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/espana/fundacion-aquae/17/05/17/cuantos-tipos-agua-existen-segun-dureza> (Consulta: 06-09-2022)

García, A., Rodríguez, B., Giraldo, H., Quintero, Y., Quezada, R., Hassan, N. y Estay H. (2021) Copper-Modified Polymeric Membranes for Water Treatment: A Comprehensive Review. Membranes, vol. 11. pp. 93.

García, J. (2015) Obtención y caracterización de membranas poliméricas de ultrafiltración de bajo ensuciamiento y estudio de condiciones de fabricación. Tesis doctoral. Repositorio Institucional, Universidad Politécnica de Valencia.

García-Pérez, G. (2005) Estudio de la degradación por radiación ultravioleta de la mezcla poliestireno de alto impacto y policarbonato. Tesis de Maestría. Ciudad de México, México: Repositorio, Instituto Politécnico Nacional.

García-Román, M. (2010) Curso 2009-2010. Bloque III. Tratamientos específicos de vertidos industriales, parte II. Documento inédito. España: Dpto. de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias, Universidad de Granada UGR.

García-Tsai, M., Montero, J. y Calle, W. (2012). Plasma: una tecnología de gran potencial para la industria y la ciencia. INGENIUS, pp. 66-72.

Gerling-Cervantes, N. (2013) Desarrollo de un protocolo óptimo para el estudio de complejos moleculares de ADN-proteína por medio de Microscopía de Fuerza Atómica. Tesis de Maestría. San Luis Potosí. Repositorio Institucional, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Ghanbarizadeh, P., Mehdi, M., Abbasi, M., Osfour, S., Javad, M., Rostami, A., Dibaj, M. y Akrami, M. (2022) Performance Enhancement of Specific Adsorbents for Hardness Reduction of Drinking Water and Groundwater. Water, vol. 14(17), no. 2749.

Gómez, R. y Murillo, R. (2006) Espectroscopía infrarroja. Facultad de Ciencias UNAM. Disponible en: <https://sistemas.fciencias.unam.mx/~fam/Infrarroja.pdf>. (Consultado: 22-11-2022)

González-Campayo, I. (2020) Análisis técnico-económico de una planta de desalación de agua salobre mediante electrodiálisis. Trabajo de fin de grado. España: Universidad de Sevilla.

González, M. (2012) Propiedades químicas y físicas de polímeros. E.T.S.I.A. Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en:

https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/9641/CC_32_art_3.pdf;sequence=1. (Consultado 30-09-2022)

González-Ruíz, M. (2018) La calidad del agua para fines analíticos. Depósito de Investigación Universidad de Sevilla. Disponible en: <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/82768/Gonzalez%20Ruiz%2C%20Mar%C3%ADa%20Luisa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (Consultado 04-09-2022)

Grieseler, R. (2021) Microscopía de fuerza atómica. (Video online) Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=zsCeLuLj6aE>. (Consulta 14-10-2022)

Grundfos México. (2020) Dureza del agua (en línea) disponible en: <https://www.grundfos.com/mx/learn/research-and-insights/water-hardness>. (Consulta: 09-09-2021)

Guías para la calidad del agua de consumo. Aspectos relativos a la aceptabilidad: sabor, olor y apariencia. Ginebra: World Health Organization, 2011, cuarta edición, pp. 257-268.

Guizard, C. (1999) Clasificación de las membranas y de los procesos que las utilizan. Disponible en: <https://es.firp-ula.org/wp-content/uploads/2019/07/S452B.pdf>. Laboratorio de Formulación, Interfases, Reología y Procesos. Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. (Consultado: 06-10-2022)

Guzmán, S. (2006) Obtención de plástico biodegradable a partir de la nixtamalización del maíz. Tesis de Licenciatura. Ciudad de México: Facultad de Estudios Superiores Zaragoza, Universidad Nacional Autónoma de México.

Harris, D. (2016). Valoraciones con EDTA. En: Análisis Químico Cuantitativo. Ed. por Freeman, H. Barcelona-España: Reverté., 3a Ed. págs. 258-277.

Hazrati, H., Jahanbakhshi, N. y Rostamizadeh, M. (2018). Hydrophilic polypropylene microporous membrane for using in a membrane bioreactor system and optimization of preparation conditions by response surface methodology. Polyolefins Journal., vol. 5 (2), pp. 97-109.

Hermida, É. (2011) Polímeros. En I. N. Tecnológica, Colección Encuentro Inet. Capítulo 9., pp. 26-29.

Hernández, A., Bautista, S., Velázquez, M., Rodríguez, S., Corona, M., Solano, A. y Bosquez, E. (2005) Potencial del Quitosano en el Control de las Enfermedades Postcosecha. Revista Mexicana de Fitopatología, vol. 23 (2), pp. 198-205.

Hernández, O., Núñez, A. y Tapia, M. (2016). Surface Modification of Polypropylene Membrane Using Biopolymers with Potential Applications for Metal Ion Removal. Journal of Chemistry. Hindawi Publishing Corporation., vol. 2016, Article ID 2742013, pp. 11.

Hernández, O. y Gómez, R. (2017) Tratamiento biológico–ultrasónico nueva alternativa en la degradación de polipropileno. Revista Iberoamericana de Polímeros, vol. 18(2), pp. 115-126.

Hernández-Hernández, E. (2011) Funcionalización de nanopartículas por plasma y su efecto en las propiedades de nanocompuestos poliméricos. Tesis de doctorado. Saltillo, Coahuila: Centro de Investigación en química aplicada CIQA.

Hernández, I. (2004) La quitosana: Un producto bioactivo de diversas aplicaciones. Cultivos Tropicales, vol. 25(3), pp. 97-110.

Hernández, O. (2015) Evaluación de la degradación de una membrana de polipropileno modificada con monómeros naturales. Tesis de Doctorado. Toluca, Estado de México: Universidad Autónoma del Estado de México.

Hernández-Sampieri, R., Fernández, C. y Baptista, P. (2014). Los procesos de la investigación mixta. En: Metodología de la Investigación. Ed. por: Rocha, M. México, D. F.: Mc Graw Hill Education. págs. 566-581. Sexta Edición.

Herrera-Cerecero, R. (2020) Tecnología de membranas. Primeras consideraciones para el diseño de una planta de reciclaje de membranas de OI. Tesis de maestría. Alcalá de Henares, España: Universidad de Alcalá y Universidad de Rey Juan Carlos.

Heuts, J. y Muñoz, A. (2010) Diseño macromolecular por transferencia de cadena. Real Sociedad Española de Química, vol. 106(1), pp. 30–36.

Himma, N., Anisah, S., Prasetya, N. y Wenten, G. (2016) Advances in preparation, modification and application of polypropylene membrane. Journal of Polymer Engineering., vol. 36 (4), pp. 329-362.

Huisa, A. (2015) Tecnologías de membrana electrodialisis. Disponible en: <https://es.slideshare.net/alvarohuisa/tecnologa-de-membrana-electrodialisis> (Consultado: 08-09-2022)

Intech (2019) Cos'e il calcare e perchè è un problema? (en línea) Disponible en: <https://www.intech-cr.com/Cos-e-il-calcare-e-perche-e-un-problema.htm> (consulta: 10-09-2022)

Julián-Soto, F. (2009) La dureza del agua como indicador básico de la presencia de incrustaciones en instalaciones domésticas sanitarias. Ingeniería. Investigación y Tecnología, vol. XI (2), pp.167-177.

Kelly, M. (2020) Atom Transfer Radical Polymerization (ATRP) Overview (Video online) disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=dqg5BkZj2BY&t=252s> (consulta: 04-10-2022)

Khoerunnisa, F., Hendrawan, Rizki, D. y Agiawati, R. (2018). Effect of MWCNT Filler on Properties and Flux of Chitosan/ PEG based Nanocomposites Membranes . EDP Sciences, 156, 04001.

Labeaga, A. (2018) Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones. Tesis de maestría. España: Universidad Nacional de Educación a Distancia. Disponible en: http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Alabeaga/Labeaga_Viteri_Aitziber_TFM.pdf (consultado: 25-10-2022)

Lárez-Velásquez, C. (2006). Quitina y quitosano: materiales del pasado para el presente y el futuro. Avances en Química, vol. 1 (2)., pp. 15-21.

Larios, A., Mujica, V., Rodríguez, M, y Pérez, C. (2007) Análisis de las variables involucradas en el proceso de desmineralización e agua en una empresa ensambladora de vehículos. Revista INGENIERÍA UC, vol. 14(1), pp. 42-51, ISSN: 1316-6832.

López-García, U. (2005) Aplicación de la electrodiálisis a la eliminación de nitrato en agua. Tesis de maestría. México: CONACYT, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica.

López, J. (2017) Enlaces químicos, fuerzas intermoleculares y su relación con Ciencias de la Tierra. Tesis de Licenciatura. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

López-Tolentino, G. (2012) Ventajas y desventajas de los plásticos degradables para su aplicación en la agricultura sustentable o ecológica. Tesis de Especialización. Coahuila, México: Centro de Investigación en Química Aplicada.

Martínez-González, H. (1979) Las técnicas de investigación documental. México: UAM-COSEL, primera edición.

Martínez, Y. (2005) Modificación superficial de materiales por plasma para aplicaciones médicas. Caso de estudio para especialización. México: Centro de Investigación en Química Aplicada.

Máxima-Uriarte, J. (2021) Fuerzas Intermoleculares (en línea) disponible en: <https://humanidades.com/fuerzas-intermoleculares/#:~:text=Son%20fuerzas%20de%20atracci%C3%B3n%20entre,a%20la%20carga%20del%20ion.> (consulta: 20-11-2022)

Miranda, J. (2015) Reacciones y sus mecanismos en la degradación de polímeros. Tesis de Licenciatura. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.

Misrar, W., Loutou, M., Saadi, L., Mansori, M., Waqif, M. y Favotto, C. (2017) Cordierite containing ceramic membranes from smectetic clay using natural organic wastes as pore-forming agents. Journal of Asian Ceramic Societies, vol. 5 (2), Pages 199-208.

Mondragón, P. (2017) Espectroscopía de infrarrojo para todos ...y 51 espectros de alimentos consumidos en México. ISBN 978-607-97548-4-6. Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C. Disponible en: https://ciatej.mx/files/divulgacion/divulgacion_5a43b7c09fdc1.pdf (consultado: 02-11-2022)

Monje, B. y Ferrero, P. (2021) Polimerización y despolimerización de poliésteres con enzimas. Revista PQ, Número 1267. Disponible en: <https://www.revistapq.com/texto-diario/mostrar/3153868/polimerizacion-despolimerizacion-poliesteres-enzimas>. (consultado 15-09-2022)

Morales-Balado, G. (1998) Síntesis de Copolímeros injertados mediante iniciadores Poliméricos: Estudio sobre el mecanismo de formación de injertos. Tesis doctoral. Coahuila, México: Universidad Autónoma de Nuevo León-Centro de Investigación en Química Aplicada-Universidad Autónoma de Coahuila.

Moreno, A. y Peñaranda, I. (2016) Factores que afectan la calidad de aguas de uso agrícola. (en línea) disponible en: <https://www.metroflorcolombia.com/factores-que-afectan-la-calidad-de-aguas-de-uso-agricola/> (consulta: 02-09-2022)

Moreno-Benavides, J. (2011) Diseño de planta de tratamiento de agua de osmosis inversa para la empresa DOBER OSMOTECH DE COLOMBIA LTDA. Pasantía Institucional de Licenciatura. Colombia: Universidad Autónoma de Occidente.

Mota, A. (2011). TEMA 6. Química de las aguas naturales. Disponible en: <https://www.ugr.es/~mota/Parte2-Tema06.pdf>. (Consultado 21-09-2022)

M. T. AutoChem (2020). What is ATR? (Attenuated Total Reflectance) (Video online) Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=QW2uh1BQuGw>. (Consulta 10-10-2022)

Nalco Chemical Company, Kemmer, F. y McCallion, J. (1989). Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. México: McGraw-Hill.

Navarro, A., Manrique, A., Iparraguirre, E., Díaz, C., Jacinto, C., Cuizano, N. y Llanos, B. (2010) Síntesis y caracterización de quitosano cuaternario nativo y

reticulado en polvo para su aplicación en la absorción de aniones metálicos. Revista de la Sociedad Química del Perú, vol. 76 (4), pp. 313-321.

Neira-Gutiérrez, M. (2006) Dureza en aguas de consumo humano y uso industrial, impactos y medidas de mitigación. Estudio de caso: Chile. Tesis de Licenciatura. Chile: Universidad de Chile.

Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001. (2000). ANÁLISIS DE AGUA - DETERMINACIÓN DE DUREZA TOTAL EN AGUAS NATURALES, RESIDUALES Y RESIDUALES TRATADAS - MÉTODO DE PRUEBA. Secretaría de Economía.

Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. (1995). SALUD AMBIENTAL. AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO. LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACIÓN. Diario Oficial de la Federación.

Orozco, L., Nava, P., Guarneros, C. y Caballero, F. (2019) Filtración de agua por membranas. CINVESTAV, vol. 4 (4).

Pacheco-López, N. (2010) Extracción biotecnológica de quitina para la producción de quitosanos: caracterización y aplicación. Tesis de doctorado. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana.

Pagliari, S. N. y Way, J. D. (2002) Innovations in palladium membrane research. Separation & Purification Reviews, vol. 31(1), pp. 1-169, DOI: 10.1081/SPM-120006115

Pellis, A., Guebitz, G. y Stephen, G. (2022) Chitosan: Sources, Processing and Modification Techniques. Gels, vol. 8(7), pp 393.

Pérez-Rodríguez, L. (2010) Biopolímeros como una alternativa de sustitución de polímeros sintéticos. Tesis de Licenciatura. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional.

Pérez, S., Miranda, S., Lin-Ho, S., Álvarez, J., Pérez, J., Corrales, K. y Morales, J. (2016) Membranas de nanofiltración, preparadas vía polimerización en interfase,

dopadas con nanopartículas de ZnO: Efecto en su desempeño. Revista Mexicana de Ingeniería Química, vol. 15(3), pp. 961-975. ISSN: 1665-2738.

Poletto, P., Duarte, J., Lunkes, M., dos Santos, V., Zeni, M., Meireles, C., Filho, G. y Bottino, A. (2012). Avaliação das características de transporte em membranas de poliamida 66 preparadas com diferentes solventes. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 22(3), pp. 273-277.

Posada-Bustamante, B. (2006) La degradación de los plásticos. Revista Universidad Eafit., No. 94, pp. 67-86.

Prodetecs. (2019) Componentes clave de un sistema de ósmosis inversa. (en línea) disponible en: <https://prodetecs.com/componentes-clave-de-un-sistema-de-osmosis-inversa/> (consulta: 11-09-2022)

PureAqua Inc. (2018) Sistema de Ósmosis Inversa Industrial. (en línea) disponible en: <https://es.pureaqua.com/sistemas-osmosis-inversa-industrial/> (Consulta: 06-09-2022)

PureAqua Inc. (2018) Sistema Industrial de Nanofiltración. (en línea) disponible en: <https://es.pureaqua.com/sistema-industrial-de-nanofiltracion/> (Consulta: 06-09-2022)

Puritec de México. (2019) Nanofiltración. (en línea) disponible en: <https://www.manantialwater.com.mx/purificacion/nanofiltracion/> (Consulta: 06-09-2022)

Ramírez, L. (2015) Validación de técnicas de análisis para dureza total y turbiedad en el laboratorio de control de calidad de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado del municipio de IBAGUÉ IBAL S.A E.S.P. Trabajo de grado. Ibagué, Colombia: Escuela de Ciencias Básicas, Tecnologías E Ingenierías, Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

Ramírez, L., Saenz, A., Castañeda, A., López, L. y González, P. (2015) Polimerización Radicálica Controlada por Transferencia de Átomos (ATRP), una

alternativa para la elaboración de materiales poliméricos controlados. *AFINIDAD LXXII*, vol. 571, pp. 202-206.

Recio del Bosque, F. (2012) Enlace Químico: Modelos de enlaces e interacciones intermoleculares. En: *Química Inorgánica*. Ed. por Martínez, A. México, D.F.: McGrawHill., pp. 128-133.

Reyna-Ávila, B. (2014) "El intercambio iónico, su descripción y comportamiento químico". Proyecto de investigación de Licenciatura. México: Instituto Politécnico Nacional.

Ribeiro, R., Bergamasco, R., Marcelino, G. y Muller, C. (2007). Preparación de Membranas para Producción de Agua Potable. *Información Tecnológica*, vol. 18(1), pp. 15-21.

Ríos, E., Ochoa, L. y Morales, J. (2016) Efecto del tratamiento con ultrasonido sobre las propiedades funcionales y estructurales de almidón procedente de diversas fuentes: una revisión. *Revista de Ciencias Biológicas y de la Salud*, vol. XVIII, pp.16-23.

Rodríguez, E., Bernal, A., Gaitán, H., Kim, C., Salguero, J., Toledo, E., Vásquez, C. y Martínez, A. (2021). La Ciencia de los Polímeros Biodegradables. XXVI Verano de la Ciencia, vol. 10. ISSN 2395-9797. pp. 3-15.

Rodríguez, L. y Orrego, C. (2016) Aplicaciones de mezclas de biopolímeros y polímeros sintéticos: Revisión bibliográfica. *Revista Científica*, vol. 2, sp. 252.

Rodríguez-Zamora, J. (2009) Parámetros fisicoquímicos de dureza total en calcio y magnesio, pH, conductividad y temperatura del agua potable analizados en conjunto con las Asociaciones Administradoras del Acueducto, (ASADAS), de cada distrito de Grecia, cantón de Alajuela. *Revista Pensamiento Actual*, Universidad de Costa Rica, vol. 9 (12-13), ISSN 1409-0112, pp. 125-134.

Rojas, A., Aranzazu, L., Gaviria, G. y Carrero, J. (2014) Degradación térmica de polimetil metacrilato en múltiples extrusiones. *Ingeniería y Competitividad*, vol. 16 (2), pp. 131-142.

Romero, A. y Pereira, J. (2020) Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones. INGENIERÍA UC., vol. 27 (2), pp. 118-135.

Romo, J. y Chilpa, A. (2017) Eliminación de dureza del agua por medio de aireación. Caso de estudio. Revista Tendencias en Docencia e Investigación en Química 2017, año 3 (3), pp. 237-247.

Rosales, L. (2016) Caracterización de polialuminio y aluminio (Al), recuperado a partir de envases de Tetra Pak®, por microscopías y análisis térmicos. Tesis de Licenciatura. Tlanguistenco, México: Universidad Autónoma del Estado de México.

Ruiz-Avilés, G. (2006) Obtención y caracterización de un polímero biodegradable a partir del almidón de yuca. Ingeniería y Ciencia, vol. 2 (4), pp. 5-28.

Salamanca, E. (2016) Tratamiento de aguas para el consumo humano. Módulo Arquitectura CUC., vol.17 (1), pp. 29-48.

San Andrés, M., Chércoles, R., De La Roja, J. y Gómez, M. (2010) Factores responsables de la degradación química de los polímeros. Efectos provocados por la radiación lumínica sobre algunos materiales utilizados en conservación: primeros resultados. Disponible en:

<https://www.culturaydeporte.gob.es/en/dam/jcr:d7cb6b8e-3c5f-41d4-8726-6894ea9ea575/factrespixireinasof.pdf> (consulta 11-10-2022)

Sánchez, A., Vera, R., Muñoz, E., Gómez, E., Bernad, M. y Maciel, A. (2016) Preparación y caracterización de membranas poliméricas electrohiladas de policaprolactona y quitosano para la liberación controlada de clorhidrato de tiamina. Ciencia en Desarrollo, vol. 7 (2), pp. 133-151.

Sánchez, V. (2021) Los secretos de la dureza del agua (en línea) disponible en: <https://www.fundacionaquae.org/dureza-agua/> (consulta 13-09-2022)

Sanchis, A. (2021) Los elementos más abundantes en la corteza terrestre, ilustrados en un detallado gráfico (en línea) disponible en: <https://magnet.xataka.com/un-mundo-fascinante/elementos-abundantes-corteza-terrestre-ilustrados-detallado->

grafico#:~:text=M%C3%A1s%20concretamente%2C%20el%20ox%C3%ADgeno%20representa,metales%20b%C3%A1sicos%20y%20preciosos%20se (consulta 04-09-2022)

Santiago, B. (2016) Funcionalización de materiales nanocarbonosos con polietilenimina. Tesis de Licenciatura. Cantabria, España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad de Cantabria.

Schlackl, K., Herchl, R. y Samhaber, W. (2019). Nanofiltration of Succinic Acid in Strong Alkaline Conditions. *Membranes*, vol. 9., pp. 147.

Serrano, J. (2007) Espectroscopía infrarroja 2-Equipos y preparación de muestras. Curso: Instrumentación y métodos de análisis químico. Documento inédito. Cartagena, España: Posgrado en Ingeniería del agua y del terreno, Universidad Politécnica de Cartagena's.

Sierra, A., Meléndez, L., Ramírez, A. y Arrollo, M. (2014) La química verde y el desarrollo sustentable. *RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo*, vol. 5(9).

Solares, E. (2013) Polímeros. Ventajas y desventajas de usar polímeros (en línea) disponible en: <http://caracteristicasdepolimeros.blogspot.com/2013/10/vwntajas-y-desventajas-de-usar-polimeros.html> (consulta 08-11-2022)

Téllez, C. (2019) Aplicaciones de la espectroscopía infrarroja en el análisis de alimentos. Trabajo de Fin de Grado. Sevilla, España: Facultad de Farmacia, Universidad de Sevilla.

Thankam, R., Del Río, J., Zhang, K., Karzarjeddi, M., Liimatainen, H. y Oksman, K. (2022). Size exclusion and affinity-based removal of nanoparticles with electrospun cellulose acetate membranes infused with functionalized cellulose nanocrystals. *Materials and Design*, 110654, vol. 217, ISSN 0264-1275.

Tinoco-Martínez, G. (2016) El agua en la industria alimentaria. Los Porcicultores y su Entorno 96. BM Editores. Disponible en: <https://www.produccion->

animal.com.ar/agua_cono_sur_de_america/82-El_agua_en_la_industria.pdf
(Consulta 14-09-2022)

Toshiyuki, K., Cárdenas, A. y Rodríguez, J. (2019) Fundamentos de la microscopía electrónica de barrido. Universidad de Córdoba. Disponible en: <https://www.uco.es/investigacion/portal/component/phocadownload/category/26-cursos-mic?download=169:2019-01-14-material-curso-sem-uco> (consulta 30-11-2022)

Tovar, D. (2021) Ventajas y limitaciones del polipropileno. En: Globa Plast (en línea) Disponible en: <https://globaplast.com.mx/limitaciones-del-polipropileno/#:~:text=Desventajas%20del%20polipropileno&text=Cuando%20se%20quema%2C%20produce%20un,de%20licuarse%20por%20segunda%20vez> (consulta 11-11-2022)

Universidad de Burgos (2021) Difracción de Rayos X de Polvo (DRX-P) (en línea) disponible en: <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/rayos-x/difraccion-de-rayos-x-de-polvo-drx-p#:~:text=La%20Difracci%C3%B3n%20de%20Rayos%2DX,cer%C3%A1micas%2C%20semiconductores%20e%20incluso%20fluidos> (consulta 03-11-2022)

Universidad de Granada (s. f.) Servicio de análisis y determinación de estructuras: Espectroscopía foto electrónica de rayos X [XPS]. En: Centro de Instrumentación Científica, Universidad de Granada (en línea) disponible en: <https://cic.ugr.es/servicios-y-unidades/ficha.php?codServicio=1&unidad=77> (consulta 10-09-2022)

Universidad de Málaga (s. f.) Espectroscopía Foto electrónica de Rayos X. En: Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación, Universidad de Málaga (en línea) disponible en: <https://www.scai.uma.es/areas/aqcm/xps/xps.html#:~:text=La%20informaci%C3%B3n%20que%20se%20puede,funci%C3%B3n%20del%20espesor%20del%20material> (consulta 10-09-2022)

Universidad Politécnica de Madrid (2015) ¿Cómo eliminar la dureza del agua? En: iagua (en línea) disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/espana/universidad-politecnica-madrid/15/10/20/como-eliminar-dureza-agua> (consulta 01-09-2022)

Universidad Politécnica de Valencia (2013) Optimización del comportamiento de materiales poliméricos: Modificación superficial (video online) disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=KPu6jyFkHO4> (consulta 20-09-2022)

Universidad Politécnica de Valencia (2020) Microscopía electrónica de transmisión. En: Servicio de Microscopía Electrónica, UPV (en línea) disponible en: <http://www.upv.es/entidades/SME/info/753329normalc.html> (consulta 11-11-2022)

Urbano-Ramírez, M. (2018). Caracterización de materiales por medio de microscopía de fuerza atómica. Tesis de Licenciatura. México, D.F. Repositorio Institucional Instituto Politécnico Nacional. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/26901/Caracterizaci%C3%B3n%20de%20materiales%20por%20medio%20de%20microscop%C3%ADa%20de%20fuerza%20at%C3%B3mica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (Consultado 13-11-2022)

Valero, M., Ortegón, Y. y Uscategui, Y. (2013). Biopolímeros: avances y perspectivas. Dyna, vol. 80(181), pp. 171-180. ISSN: 0012-7353.

Vásquez, L., Wislenny, S., Vásquez, L., Wisnelklys, F., Hernández, C. y Niño, Z. (2016). Diseño de un sistema de filtración para soluciones de amina usadas en lavado de CO₂ en plantas de amoníaco. INGENIERÍA UC, vol. 23 (3), pp. 327-340.

Vázquez-Mellado, M. (2017) Sistema de tratamiento de aguas mediante osmosis inversa. Tesis de Licenciatura. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.

Veolia Water Technologies (2016) La decantación lastrada aplicada al ablandamiento con cal para el agua de torres y calderas. En: iagua (en línea) disponible en: <https://www.iagua.es/noticias/espana/veolia-water-technologies/16/09/19/decantacion-lastrada-aplicada-al->

ablandamiento#:~:text=Proceso%20qu%C3%ADmico%20de%20descarbonataci%C3%B3n%20y,Mg(OH)2 (consulta 06-09-2022)

Ward, L., Fickling, B. y Weinman, S. (2021). Effect of Nanopatterning on Concentration Polarization during Nanofiltration . *Membranes*, vol. 11., pp. 961.

Zambrano, M. (2020). Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier - FTIR (Video online) Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=29KeOW0JbEM>. (Consulta 15-10-2022)